

POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

[www.upm.es](http://www.upm.es)



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

**Escuela Universitaria de  
Ingeniería Técnica Aeronáutica**

# **HELICÓPTEROS**

*Profesores: Miguel A. Barcala Montejano  
Ángel A. Rodríguez Sevillano*

POLITÉCNICA



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

**Escuela Universitaria de  
Ingeniería Técnica Aeronáutica**

**SISTEMA  
SUSTENTADOR.  
TIPOS CABEZAS DE  
ROTOR**

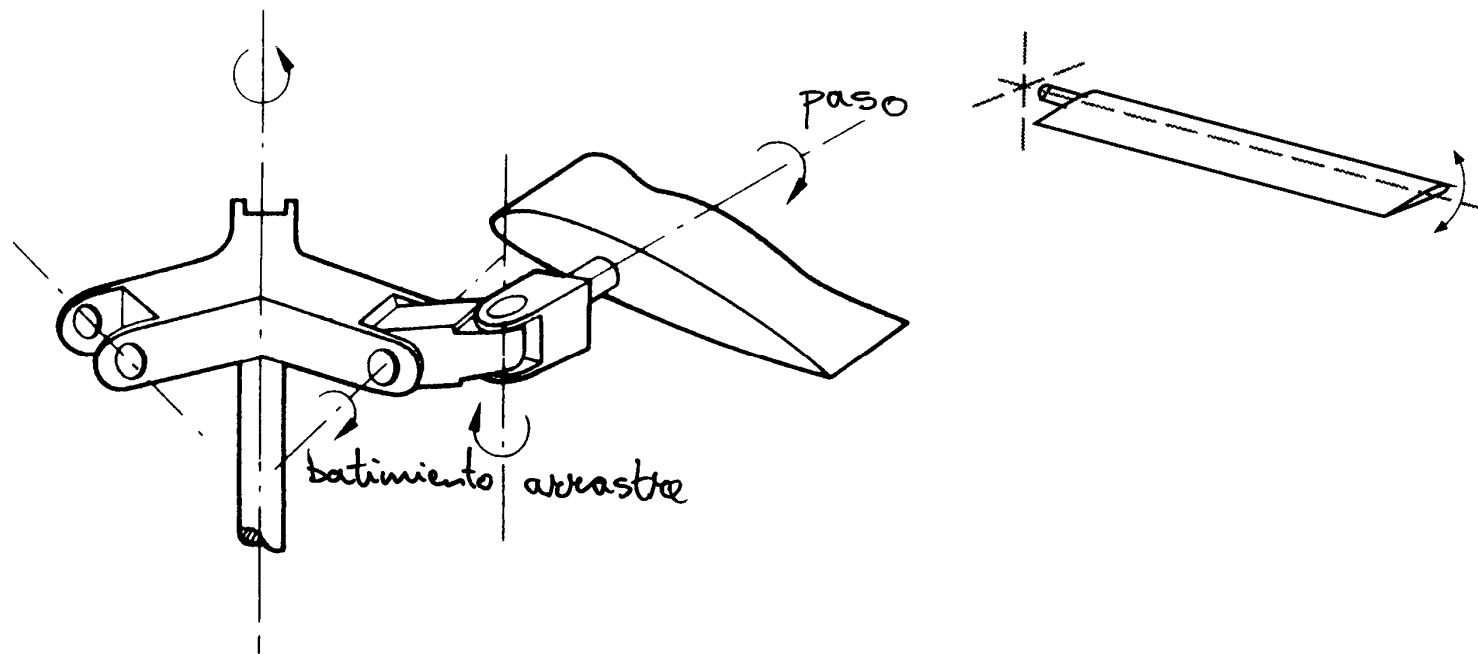
POLITÉCNICA





## INTRODUCCIÓN

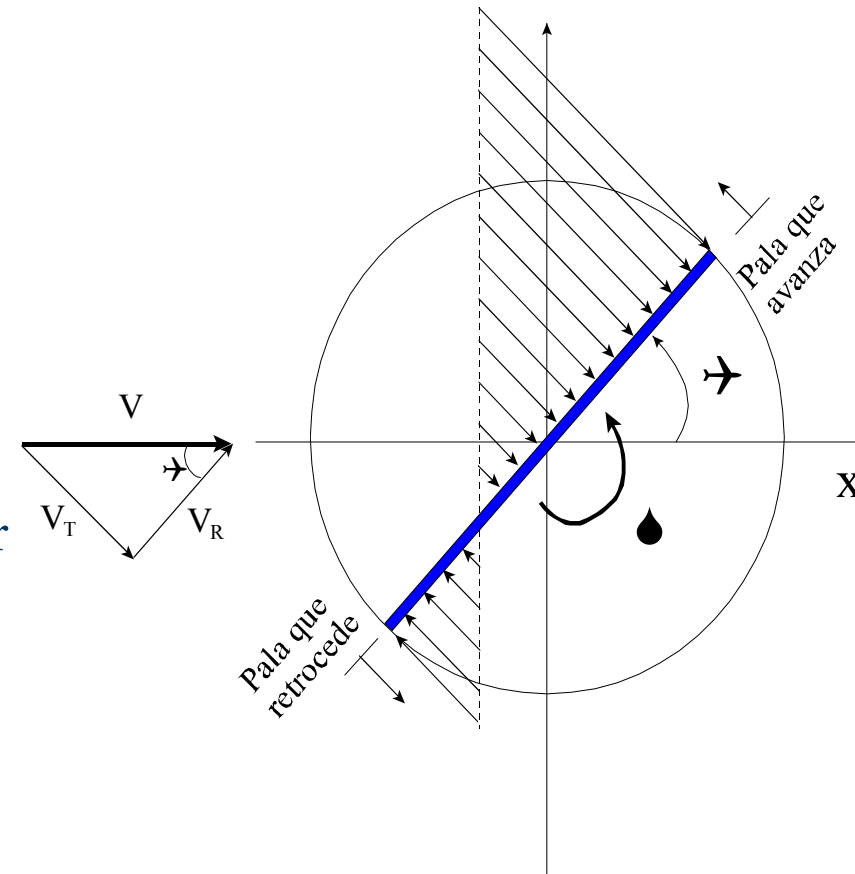
- Ejes de giro de las palas. Arrastre (movimiento *adelante/atrás*), batimiento (movimiento *arriba/abajo*) y cambio de paso.





## INTRODUCCIÓN

- Fenómeno de la asimetría de sustentación.
  - Rotor en vuelo de traslación o avance la distribución de velocidades en la pala es la de la figura.
  - Velocidad pasa de  $\Omega R$  en  $\psi=0$ ,  $\psi=\pi$  a un valor máximo en  $\psi=\pi/2$  y un valor mínimo  $\psi=3\pi/2$ .





## INTRODUCCIÓN

- Sustentación es proporcional al cuadrado de la velocidad: será mayor en la pala que avanza que en la pala que retrocede.
- La resultante estará desplazada hacia la pala que avanza y, por lo tanto, dará lugar a un par que tenderá a inclinar el helicóptero (o rotor) hacia el lado de la pala que retrocede.
- Por ejemplo, en un helicóptero monorrotor convencional, cuyo rotor principal gire en sentido antihorario, el par que aparece tenderá a inclinar el helicóptero hacia la izquierda visto desde arriba).



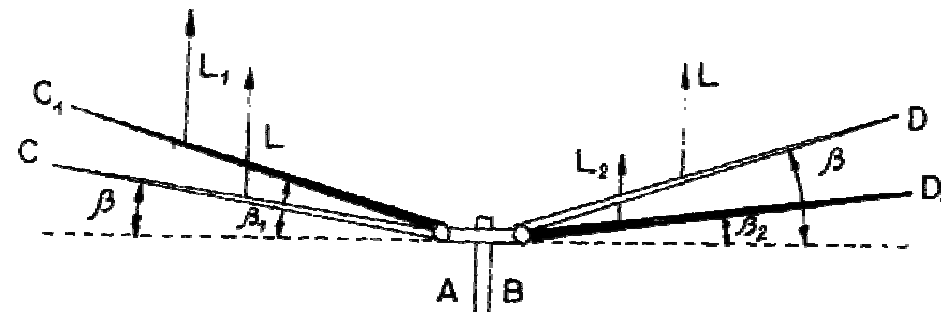
## INTRODUCCIÓN

- Formas de corregir esa asimetría: el *batimiento de la palas* o la *variación cíclica de paso*.
  - Objetivo aumentar la sustentación de la pala que retrocede y disminuirlo en la pala que avanza.
  - Habrá que aumentar el ángulo de ataque de la pala que retrocede y disminuir el paso de la pala que avanza.



## INTRODUCCIÓN

- **Batimiento:** Como el rotor opera a velocidad angular constante, las fuerzas másicas (gravitatorias y de inercia) serán constantes.
  - Para cada valor de sustentación la pala, debido a la articulación, alcanza una posición de equilibrio dada por el ángulo de conicidad  $\beta$ .
  - En el momento en el que tengamos una velocidad de avance aparecerá esa asimetría de sustentación: en la pala que avanza el ángulo de equilibrio será  $\beta_1 > \beta$  y en la pala que retrocede será  $\beta_2 > \beta$  (vista de frente).







## INTRODUCCIÓN

- **Batimiento:**

- Un elemento de la pala que avanza inicia un movimiento ascendente para pasar de  $\beta_1$  a  $\beta$ ; luego su ángulo de ataque aerodinámico será ligeramente inferior (cambia la dirección de la corriente relativa al perfil) y la sustentación disminuirá también.
- En la pala que retrocede el fenómeno es similar pero aumentando ligeramente la sustentación.
- Es decir, se produce una compensación automática de la asimetría de sustentación.
- Podemos conseguir ese batimiento también mediante deflexión elástica de la pala en el encastre que se comporte como una articulación.



## INTRODUCCIÓN

- **Variación cíclica de paso:** Calado mecánico que modificará de forma cíclica, en función de la posición  $\psi$  de la pala, el ángulo de paso de la misma.
  - Independiente del piloto.



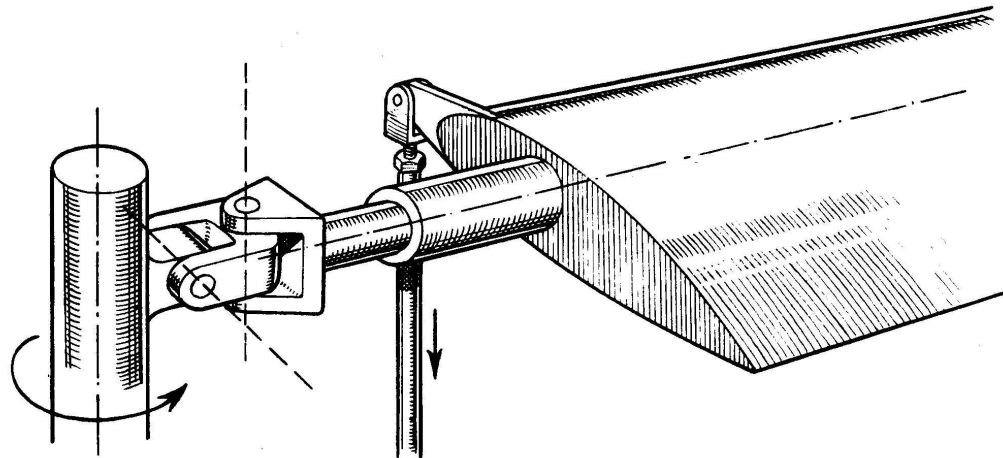
## TIPOS DE CABEZA DE ROTOR

- Existen tres tipos completamente diferentes de cabezas de rotor en cuanto a su constitución.
  - ARTICULADO
  - RÍGIDO (sin articulaciones)
  - SEMIRRÍGIDO (basculante)



## Rotor articulado

- La cabeza de rotor más común.





## Rotor articulado

- Utiliza articulaciones para reducir los esfuerzos a los que ven sometidas las palas y que pueden transmitirse indebidamente a la cabeza del rotor.
- El orden de situación de las tres articulaciones no siempre es el mismo, depende del diseño del fabricante
- Sin la introducción de la articulación de batimiento no se hubieran desarrollado con éxito los helicópteros.
  - Mérito: el ingeniero español Juan de La Cierva en su investigación y desarrollo de autogiros.
- Debido a la asimetría de sustentación entre la pala que avanza y la que retrocede, la solución no parecía fácil; optó por dotar de articulación de batimiento de forma que los dos lados del disco alcancen su propio equilibrio de fuerzas (peso, fuerzas de inercia, fuerzas aerodinámicas).

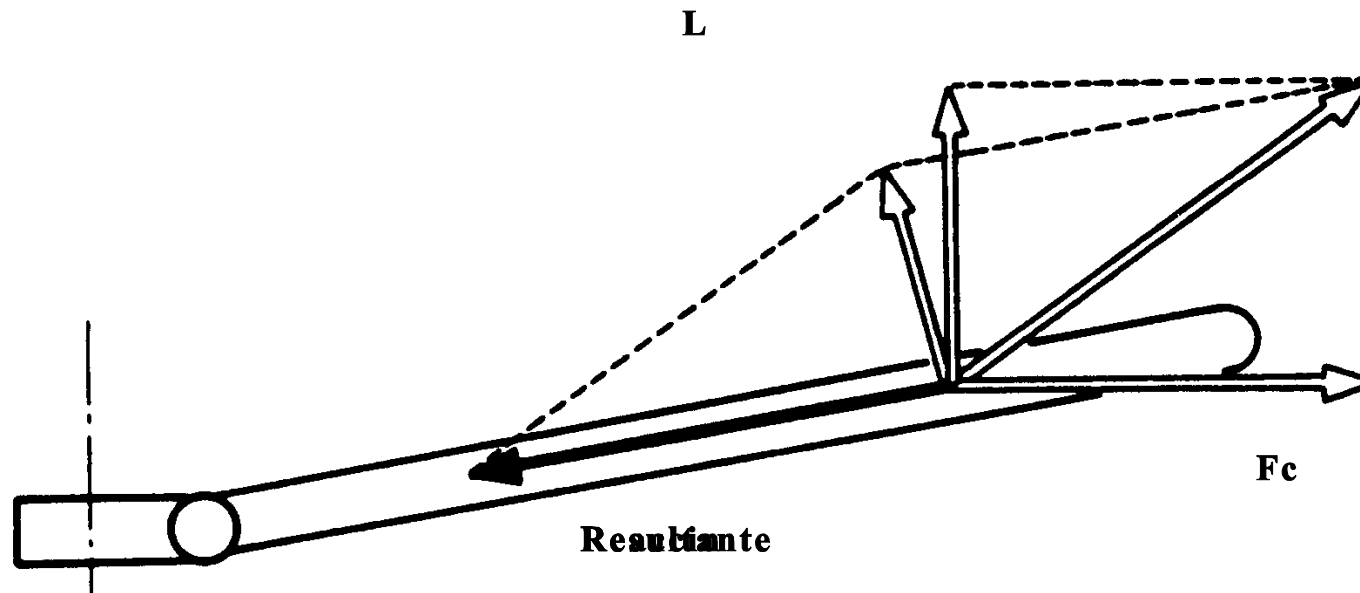


## Rotor articulado

- Gracias a la articulación de batimiento se consigue que las palas trabajen exclusivamente a tracción sin estar sometidas a esfuerzos de flexión en el encastre.
- En una condición cualquiera de vuelo, la **resultante  $R_s$**  debida a la **sustentación  $L$**  de la pala, a la **fuerza centrífuga  $F_c$**  y al **peso** de la misma (mucho menor), forma un **ángulo** con el plano perpendicular al eje de giro.
- Dado que las palas están articuladas, éstas acabarán siguiendo la dirección de la resultante (la misma dirección que la **reacción  $R_a$**  de la pala debida a la articulación).



## Rotor articulado





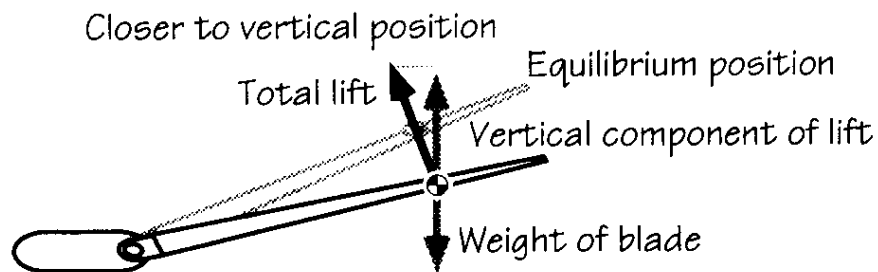
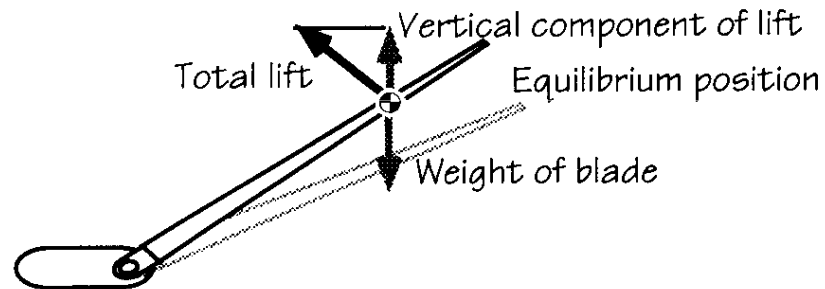
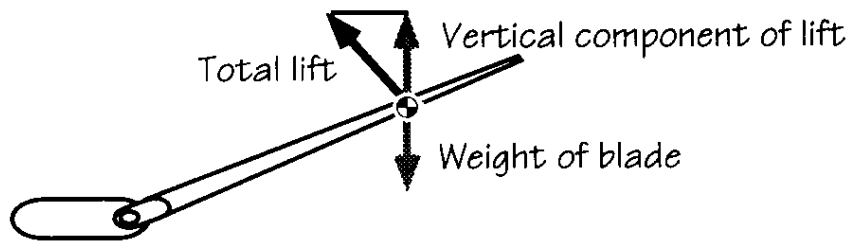
## Rotor articulado

- La pala es libre de *batir* de forma que aparecen, por ese movimiento relativo, fuerzas de Coriolis que tienden a flexar la pala en el plano de la misma.
- Además, la distribución de resistencia a lo largo de la pala (inducida y parásita) puede agravar este efecto.
- Si la sustentación aumenta, la resistencia aumenta y la resistencia tiende a frenar a las palas. Si la sustentación disminuye, la resistencia disminuye y las palas tienden a acelerarse.
- Estas variaciones producen grandes esfuerzos y sollicitaciones (fatiga) que necesitan ser eliminadas o minimizadas.





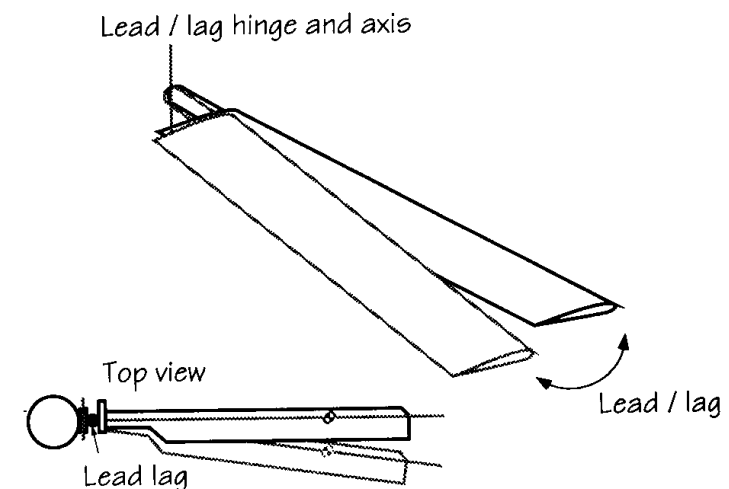
## Rotor articulado





## Rotor articulado

- Se hace necesaria una articulación que permita oscilar adelante/atrás a la pala para reducir esfuerzos.
- Introducción de una nueva articulación de eje paralelo al de rotación: articulación de arrastre, que permite a la pala tener movimiento en su mismo plano.





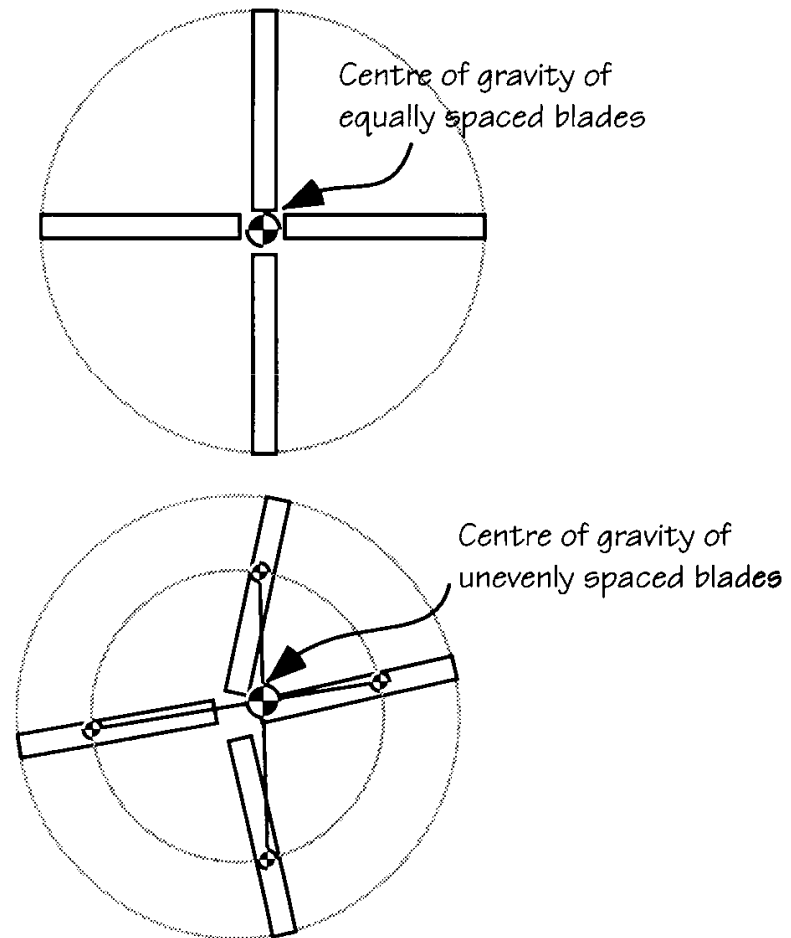
## Rotor articulado

- La introducción de esta nueva articulación de arrastre, crea otros nuevos problemas.
  - *Resonancia en suelo*
  - *Variación incontrolada del ángulo de paso*



## Rotor articulado. *Resonancia en suelo*

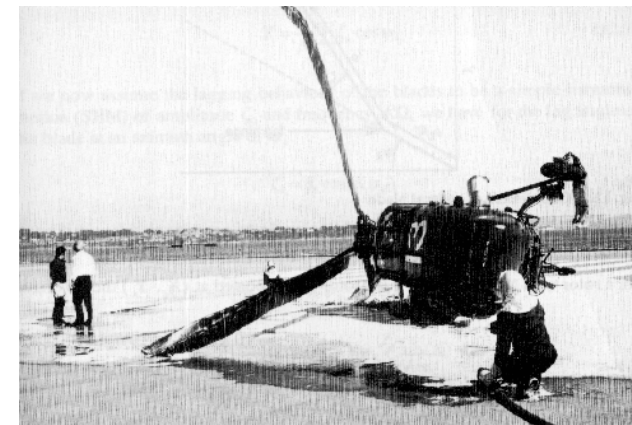
- Rotor articulado permite a las palas oscilar libremente sobre el eje de batimiento.
- Si las palas oscilarán al unísono el CG del conjunto de las palas permanecería en el centro, pero como esa oscilación es *libre* para cada pala, provoca que el CG del rotor se desplace fuera del centro provocando vibraciones en el sistema.





## Rotor articulado. *Resonancia en suelo*

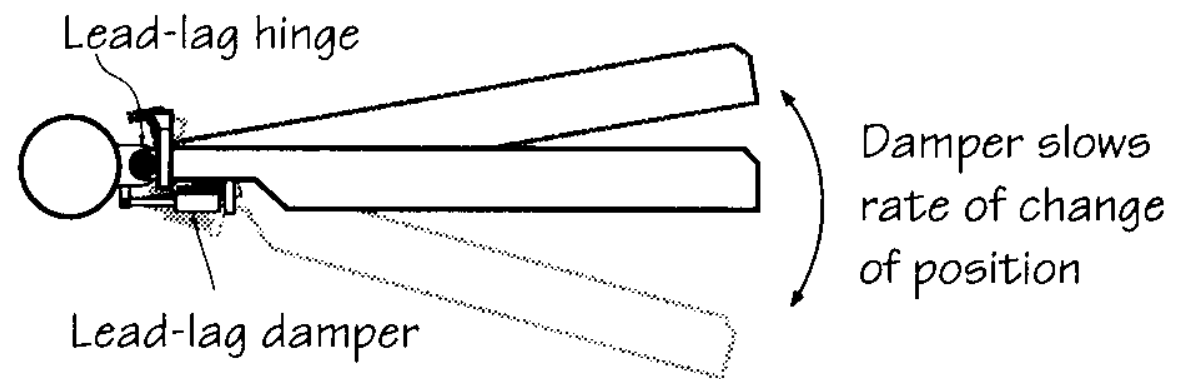
- El tren de aterrizaje y la célula del helicóptero tendrá sus frecuencias naturales de vibración (gobernadas por las características dinámicas).
- Si la frecuencia de ese movimiento vibratorio del CG del rotor es cercana o coincide con la del fuselaje y tren puede darse la condición de resonancia con el peligro que ello conlleva: que el movimiento no sea convergente y se amplifique, pudiendo producirse serio daño incluso, destrucción del helicóptero.





## Rotor articulado. *Resonancia en suelo*

- Se deberá introducir un amortiguador del movimiento de arrastre así como en la unión entre la cabeza del rotor y célula y tren de aterrizaje.
- Puede ocurrir durante la puesta en marcha, así como en el aterrizaje y parada del helicóptero.



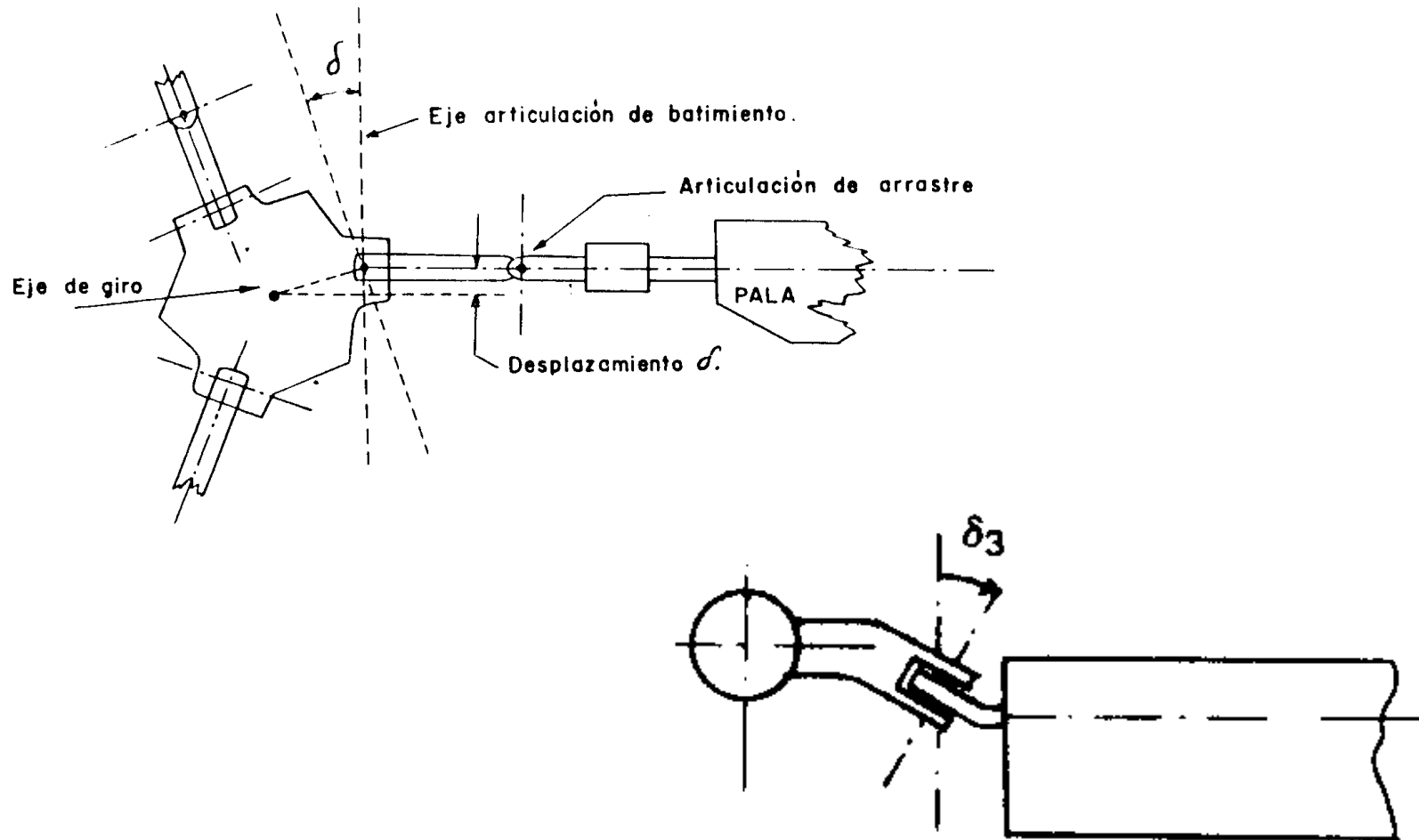


## R.a. Var. Incontrol. del ángulo de paso

- Algunos diseños de cabezas de rotor provocan un efecto de acoplamiento entre el eje de batimiento/eje de arrastre y el ángulo de paso: cuando la pala bate arriba u oscila respecto al eje de arrastre, la pala cambia de paso.
- La forma de evitarlo/reducirlo consiste en desplazar el eje de batimiento un ángulo ( $\delta_3$ ) de forma que no sea perpendicular al eje longitudinal de la pala.
- Así configurado, cuando la pala bata hacia arriba el ángulo de paso disminuirá; será reducido a medida que aumente el batimiento ascendente, y viceversa. Se conoce como articulación *delta tres*.
- Existen otras disposiciones de calado del ángulo de batimiento de filosofía totalmente análoga al anterior.



## R. a. Var. Incontrol. del ángulo de paso

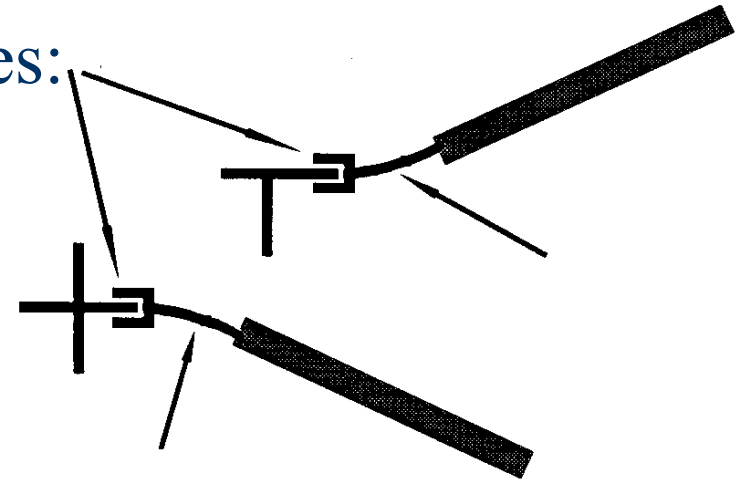






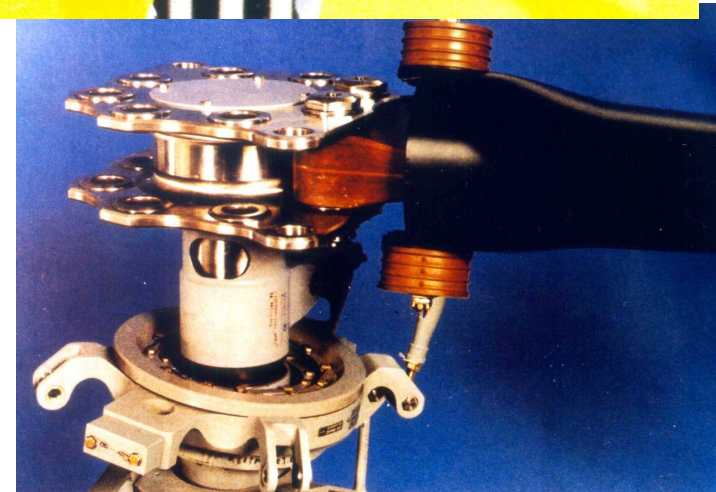
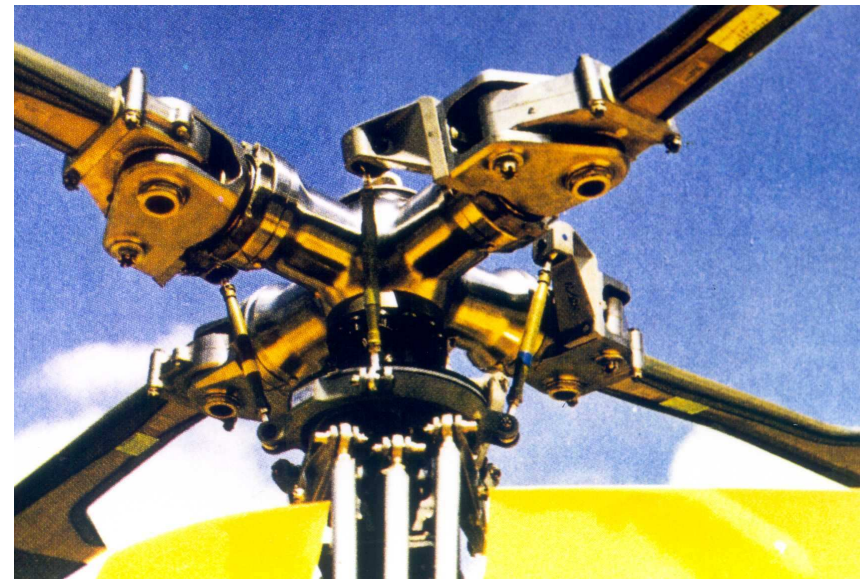
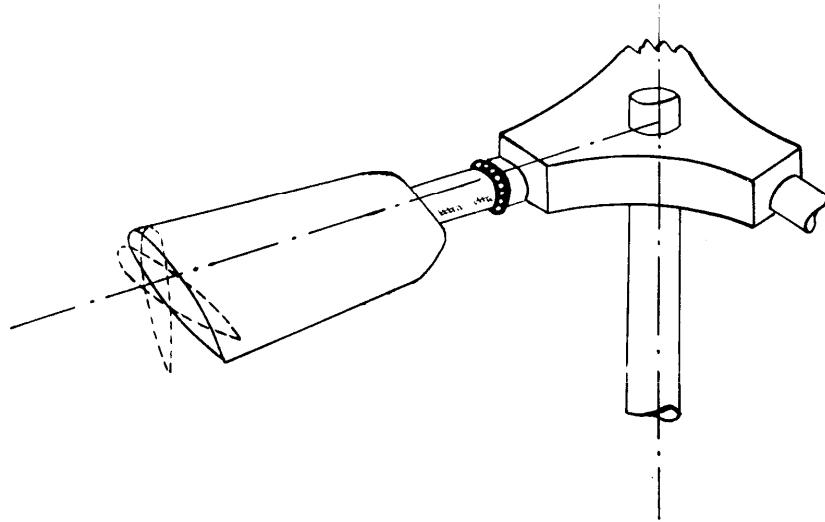
## Rotor rígido

- Eje de giro y buje están rígidamente unidos formando una única pieza.
- Palas están encastradas rígidamente al buje, teniendo solamente la libertad de giro sobre su eje longitudinal para la variación de paso.
- Características más importantes:
  - Sencillez
  - Robustez mecánica.





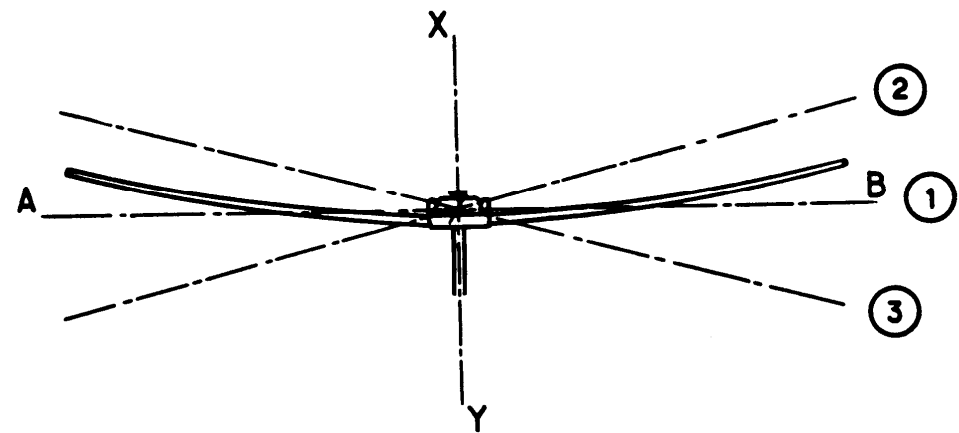
## Rotor rígido





## Rotor semirrígido (BASCULANTE)

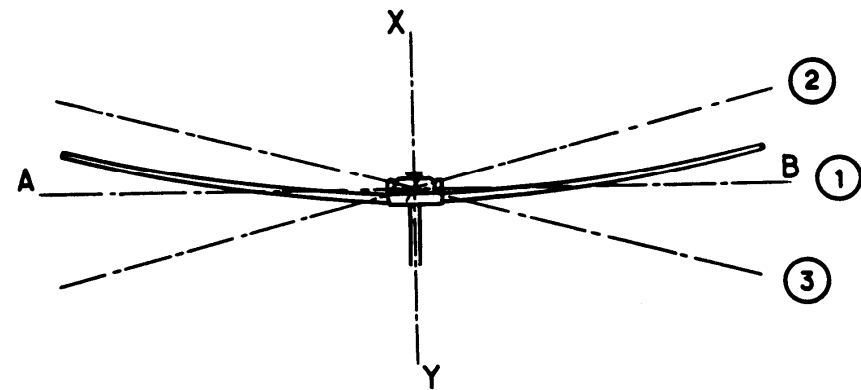
- “Combinado” de los dos anteriores.
- Elimina algunos de los inconvenientes de los rotores articulados, aunque naturalmente surgen otros propios de este sistema.
- Las palas no se articulan en el buje; es el conjunto el que puede inclinarse en todas direcciones mediante la articulación cardan o junta universal que une el buje al mástil.





## Rotor semirrígido (BASCULANTE)

- Cierta flexibilidad permite a las palas un ligero batimiento vertical individual.
- La variación cíclica se produce por pivotamiento del conjunto respecto al eje AB.
- Esta compensación obliga a que sea simultáneo el movimiento de subida y bajada de ambas palas, lo cual únicamente puede conseguirse en el caso de que el rotor tenga dos palas.





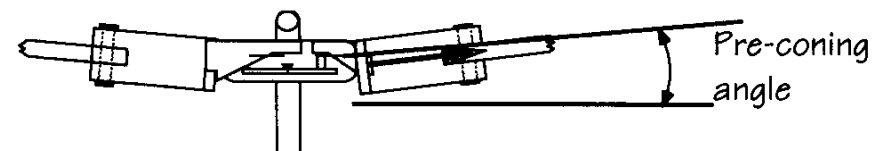
## Rotor semirrígido (BASCULANTE)

- El sistema es capaz de corregir automáticamente la asimetría de sustentación, ya que la pala que avanza puede subir a la vez que desciende la pala que retrocede gracias a que todo el sistema en conjunto puede bascular.
- En condiciones normales de vuelo, este tipo de rotor está sometido a esfuerzos de flexión en los encastramientos de las palas.



## Rotor semirrígido (BASCULANTE)

- Para tratar de mitigar estos esfuerzos todo lo posible, las palas están caladas con un ángulo de conicidad que corresponde al existente en condiciones de crucero en la que la pala trabajará casi exclusivamente a tracción.
- Cuando estas condiciones varíen las palas estarán sometidas a esfuerzos de flexión.
- Al no existir la articulación de batimiento, tampoco es preciso la de arrastre.





## Rotor semirrígido (BASCULANTE)





## R. *basc.* *Estabil. del movimiento*

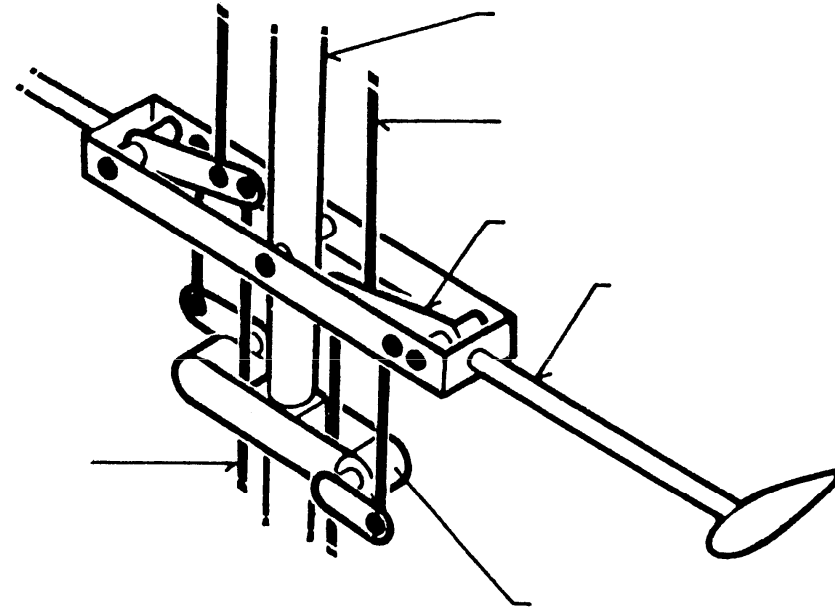
- En rotores articulados, las palas tienen cierta tendencia a mantener su plano de giro constante, respondiendo a la asimetría -disimetría- de sustentación con cierto retardo.
- Un rotor semirrígido es relativamente más inestable y se debe introducir algún sistema amortiguador para producir una estabilización automática de la respuesta ante perturbaciones en su movimiento.
- Los dos desarrollos más frecuentes son: *el sistema de barra estabilizadora Bell y el estabilizador aerodinámico Hiller.*





## R. **basc.** *Barra estabilizadora (BELL)*

- El sistema se funda en efectuar el mando a través de la posición de una barra lastrada que tiende a mantener su plano de rotación constante.
- La barra estabilizadora es básicamente un gran giróscopo cuya misión es mantenerse girando en el mismo eje a menos que haya un mando desde el puesto de pilotaje.





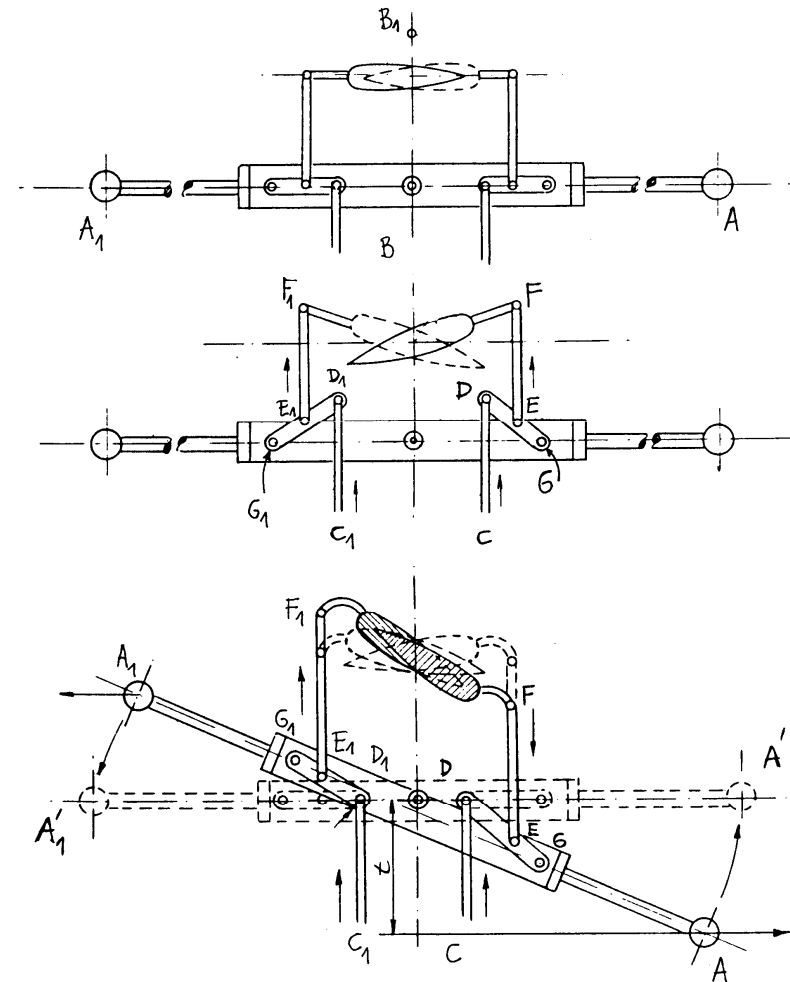
## R. **basc.** *Barra estabilizadora (BELL)*

- Si no existe un mando desde el piloto y aparece una ráfaga (una perturbación) que tiende a mover el helicóptero, la barra estabilizadora *dirige* al rotor para oponerse y amortiguar esa perturbación.
- Cuando el piloto actúa sobre los mandos, esa maniobra es seguida por el rotor y la barra estabilizadora de forma que adopta una nueva posición en el espacio.



## R. *basc.* Barra estabilizadora (BELL)

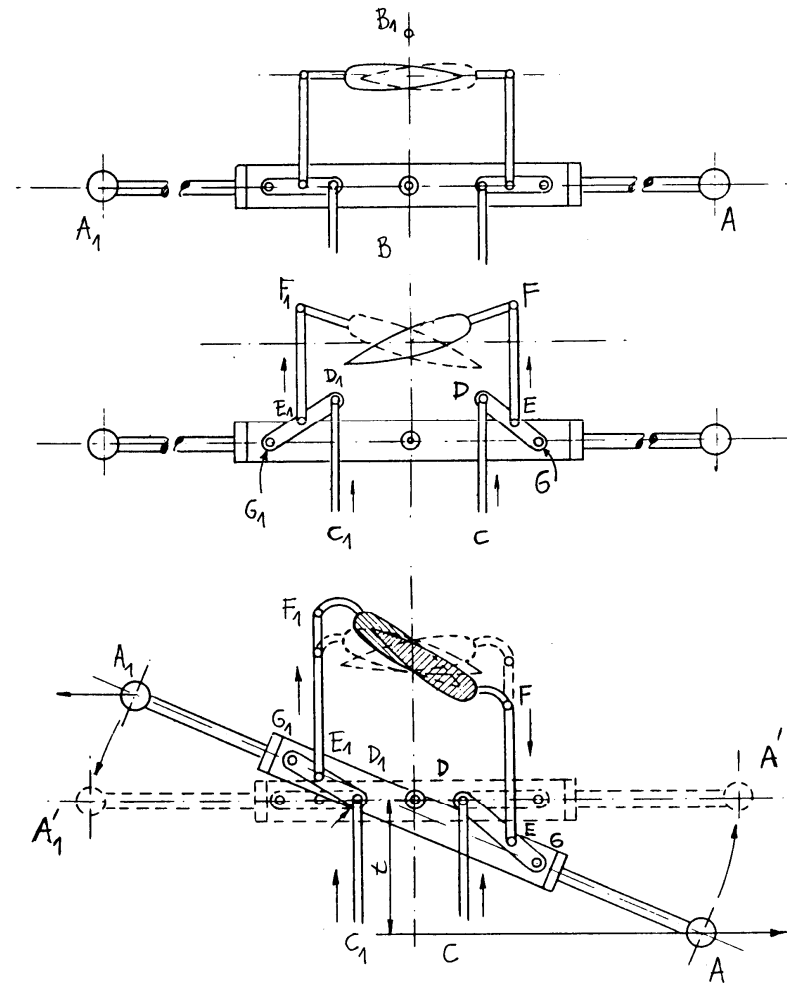
- **OC** es el eje de giro, y **A** y **B** son los contrapesos de la barra estabilizadora.
- **GH** es la varilla de mando desde la palanca para la variación del paso, y estas dos varillas transmiten su movimiento a través de la **placa HDF** (rayada).





## R. *basc.* Barra estabilizadora (BELL)

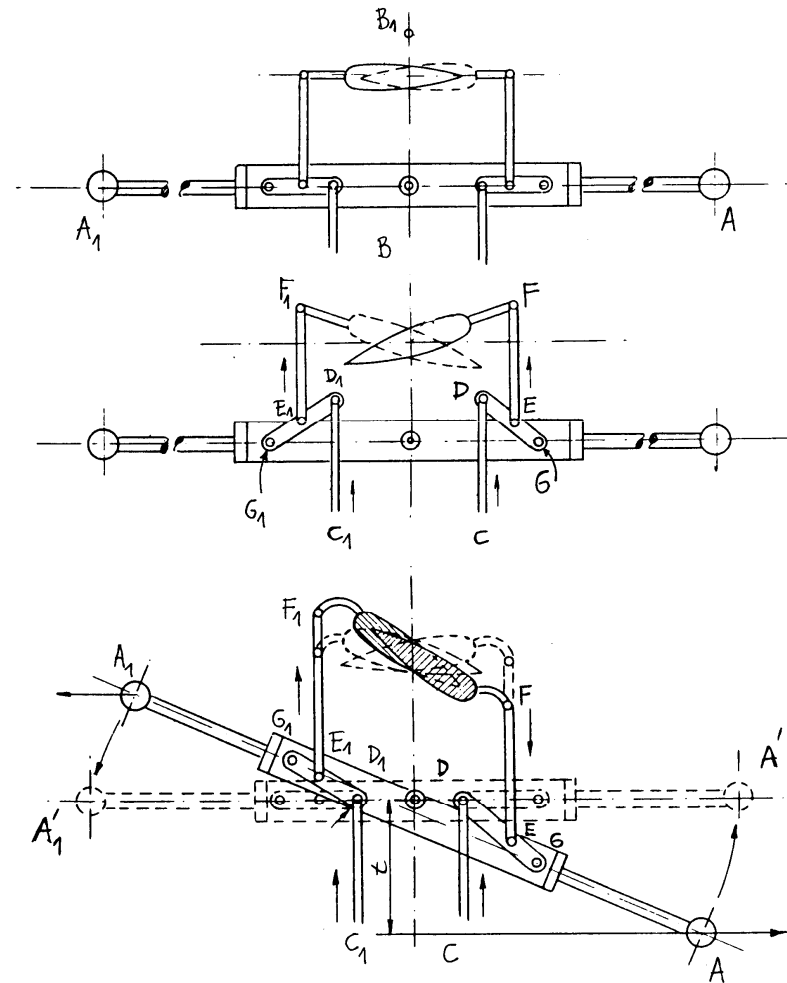
- Se supone que se manda desde la cabina del piloto de tal forma que las **barras GH** suben el sistema de barra estabilizadora mantiene su plano de rotación, el **punto F**, por tanto, está fijo y la **placa HDF** gira sobre el **punto F**, elevándose el **punto D** y, por tanto, el **punto E**.





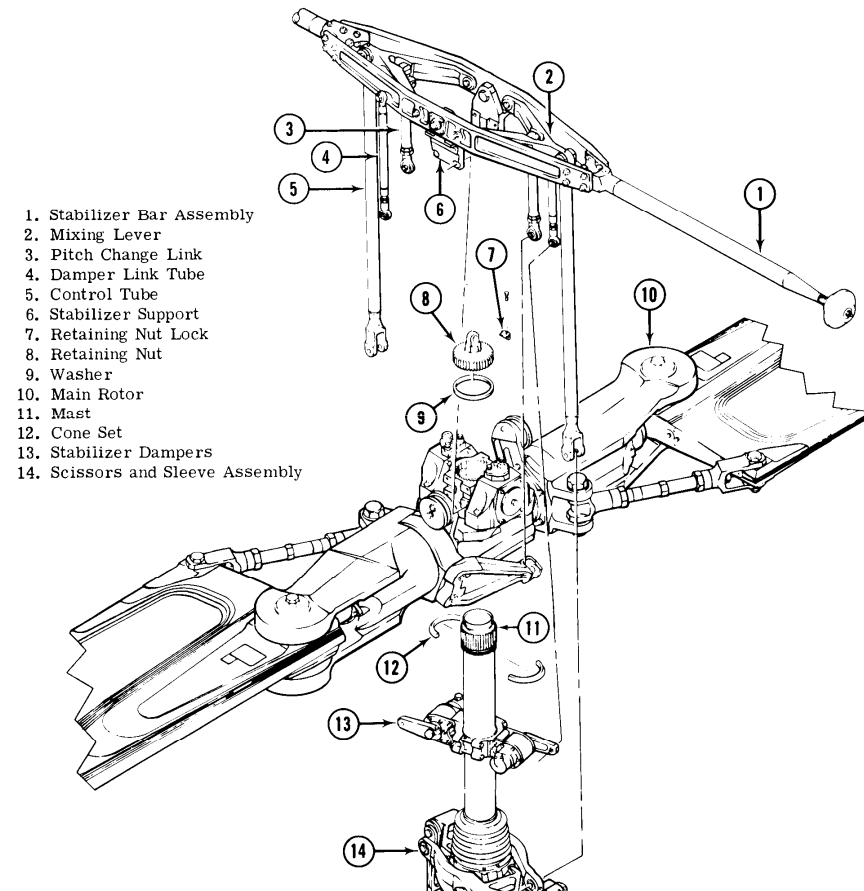
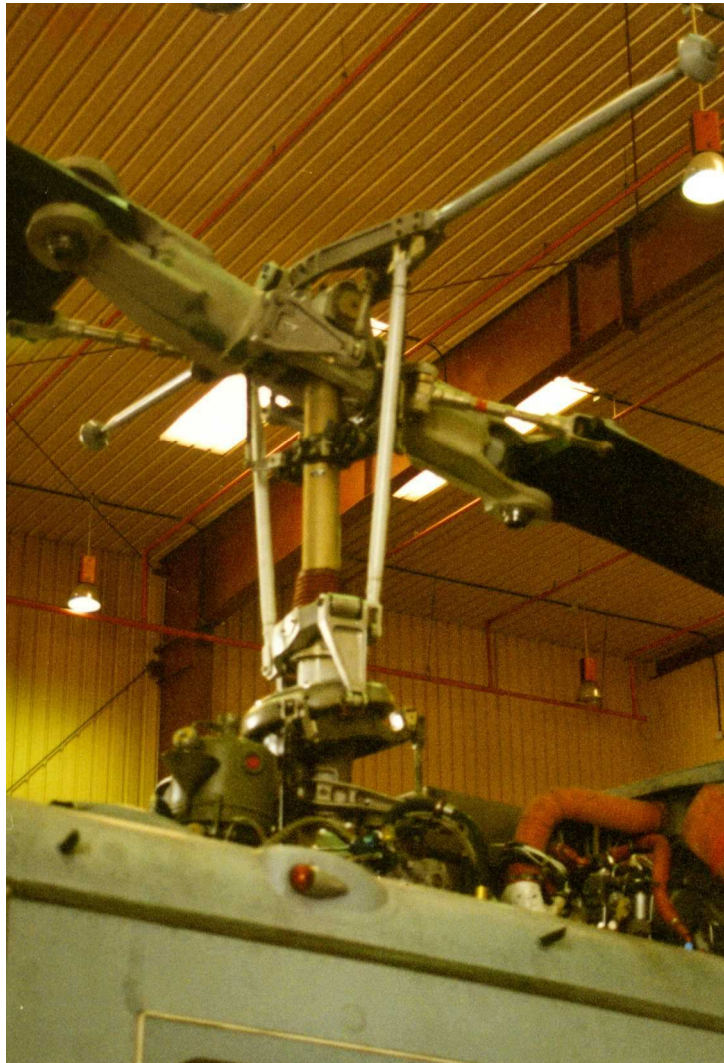
## R. *basc.* Barra estabilizadora (BELL)

- Si se supone que no existe mando alguno desde el puesto de pilotaje, pero que la pala tiene una tendencia a disminuir su ángulo de ataque; en estas condiciones la **barra ED** baja, el **punto H** permanece ahora fijo y la **placa HDF** gira sobre él; el **punto F**, por tanto, se desplaza hacia abajo obligando a inclinarse la barra estabilizadora.





## R. basc. Barra estabilizadora (BELL)





## R. *basc.* Barra estabilizadora (BELL)

- Al inclinarse ésta, las fuerzas centrífugas de los contrapesos, crean un par con relación al **punto B** de valor  $R \cdot t$  que tiende a volver a la barra estabilizadora a su posición anterior y, por tanto, la **placa HDF** vuelve a girar sobre el **punto B**, llevando el **punto E** a su posición primitiva.
- Vemos, por tanto, que sin intervención del piloto se ha eliminado la tendencia del rotor a variar incontroladamente el paso.
- Es, por tanto, un **SISTEMA IRREVERSIBLE**, que logra transmitir al ángulo de paso los movimientos deseados e impide a su vez que el ángulo de paso varíe.



## R. *basc.* Barra estabilizadora (BELL)

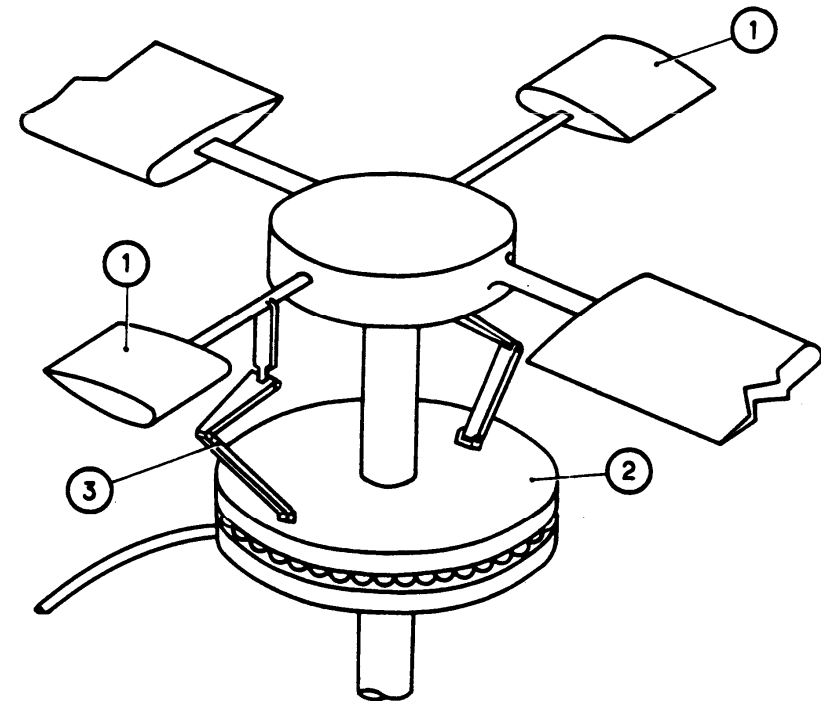
- Generalmente incluyen amortiguadores para ralentizar la respuesta de forma que no sea excesivamente rápida.
- La barra estabilizadora, por lo tanto, provoca un mando del rotor siempre en su mismo plano, por lo que puede asimilarse a un “piloto automático” produciendo un pilotaje sencillo en el vuelo estacionario.





## R. *basc.* *Estabil. aerodinámico (Hiller)*

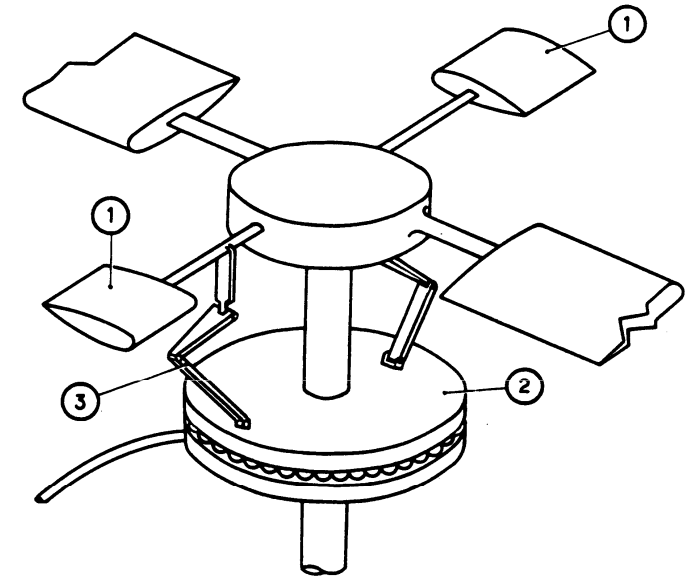
- Opera de forma similar al caso anterior, salvo que en éste actúan fuerzas aerodinámicas frente a las fuerzas de inercia que actúan en la barra estabilizadora.





## R. basc. *Estabil. aerodinámico (Hiller)*

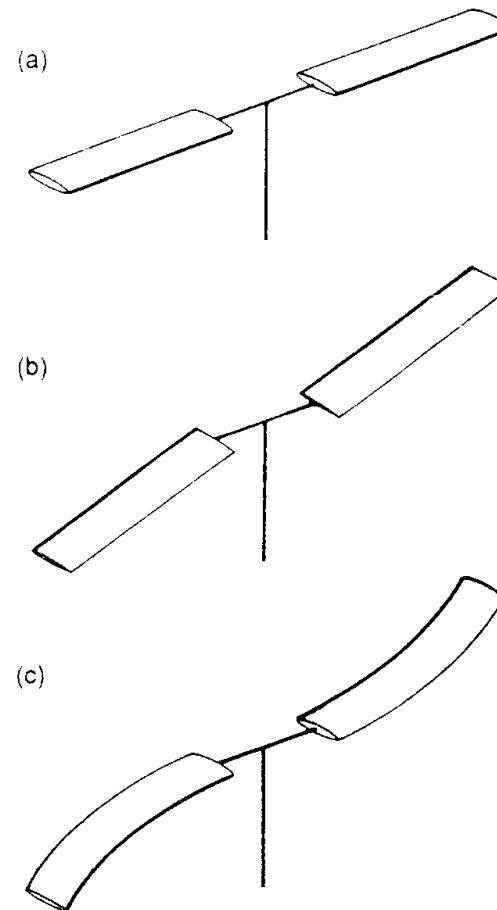
- Está formado por una barra acabada en dos superficies aerodinámicas que pueden girar alrededor de su eje longitudinal. Su ángulo de ataque se puede modificar desde la cabina de pilotaje mediante el plato y un mecanismo de enlace.
- Transmite las variaciones cíclicas del piloto al rotor pero cuando aparece una perturbación externa (ráfaga) el ángulo de ataque de las superficies se modifica y el rotor principal vuelve a la posición anterior sin intervención del piloto.





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- Comportamiento en vuelo de avance de cada uno de ellos:
  - semirrígido (*teetering*),
  - articulado (*articulated*),
  - rígido (*hingeless*).





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- Década de los sesenta: sistemas de rotor rígido.
- Problemas de inestabilidad aeromecánica y aeroelástica que no aparecían con los rotores articulados.
- La complejidad y la problemática de esos fenómenos: de la lenta evolución de ese tipo de sistemas.
- Rotor rígido, consiste en la reducción de la complejidad de la cabeza del rotor.



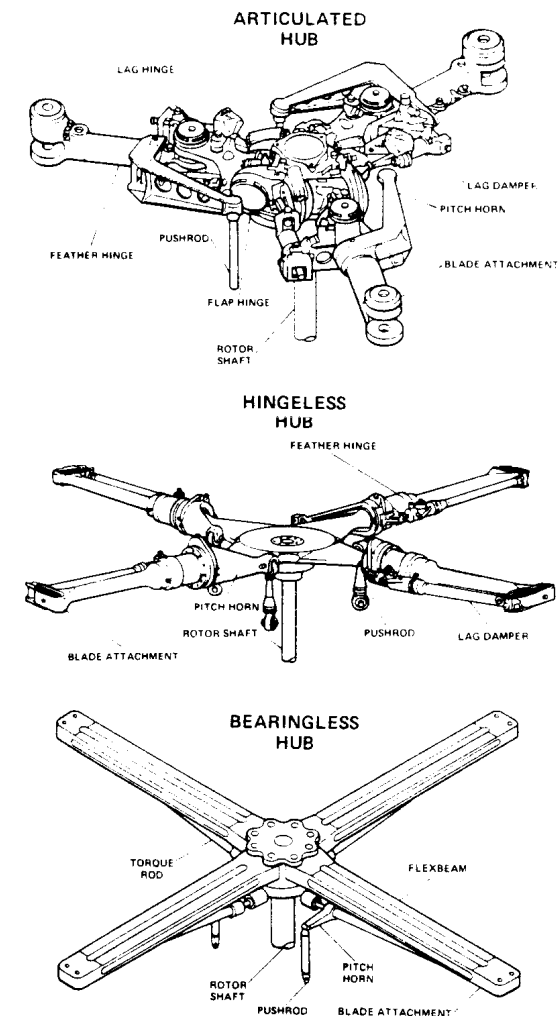
## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- La eliminación de las articulaciones reduce el peso y el coste del sistema del rotor y aumenta la fiabilidad y mantenibilidad gracias a esa disminución de la complejidad.
- Reducir el volumen de la cabeza también ofrece la posibilidad de disminuir la resistencia aerodinámica, fuente importante de la resistencia total del helicóptero en vuelo de avance.
- Figura, ejemplo de las principales configuraciones.



## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

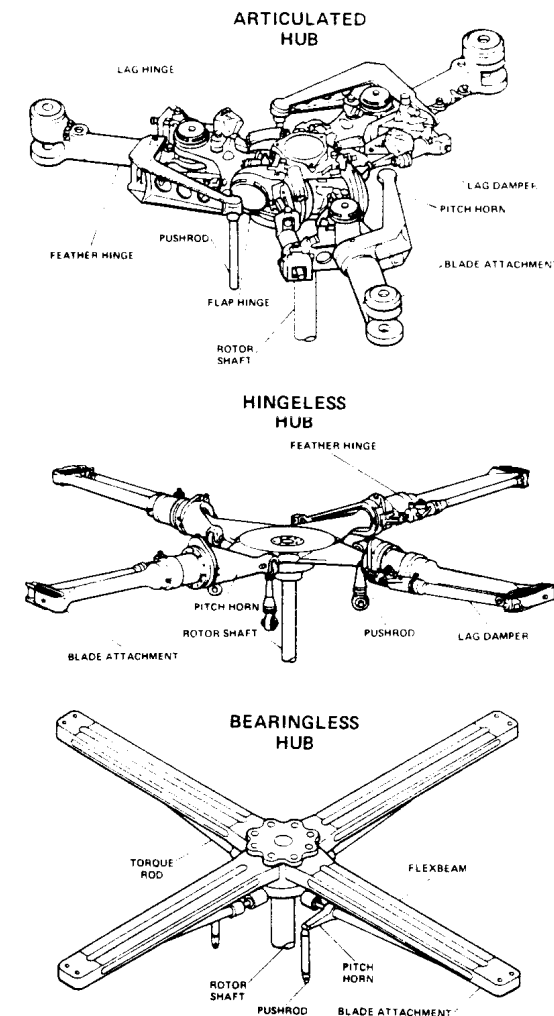
- Rotor tripala articulado, cada pala requiere un eje de batimiento, uno de arrastre más el de variación de paso.





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- Rotor cuatripala rígido, sólo se necesita el eje de variación de paso; los brazos de titanio son suficientemente robustos y flexibles como para acomodar el movimiento de las palas en vuelo.





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- Eliminar la articulación de batimiento tiene otras importantes consecuencias en el rotor y el sistema rotor-vehículo.
- El efecto combinado de todas las palas produce un momento en la cabeza del rotor que puede cambiar sustancialmente características en el control de vuelo, maniobrabilidad, respuesta en ráfagas, y estabilidad del mismo.
- Estas características pueden beneficiar, pero también hay ciertos aspectos negativos que se deberán minimizar.
- También se están desarrollando ya sistemas de rotor sin cojinetes (*bearingless*) en los que la unión entre la pala y la cabeza del rotor es mediante una barra flexible a torsión.





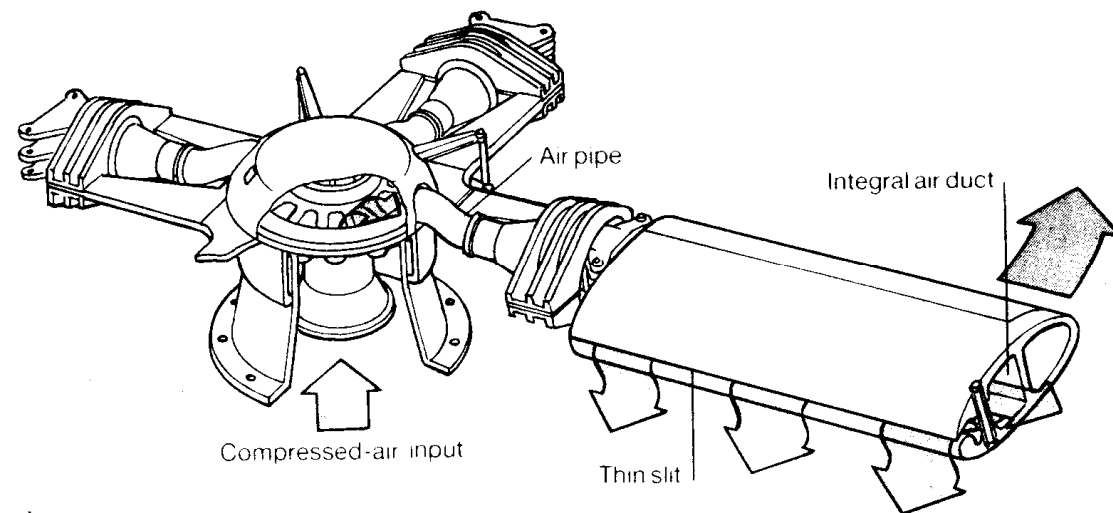
## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- Se deduce que *no existe una clara supremacía de un tipo sobre otro*, por cuanto las ventajas y desventajas están más o menos compensadas.
- Existen casas constructoras que tradicionalmente se han especializado en un tipo de rotor y cuyos productos utilizan frecuentemente el mismo sistema.



## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

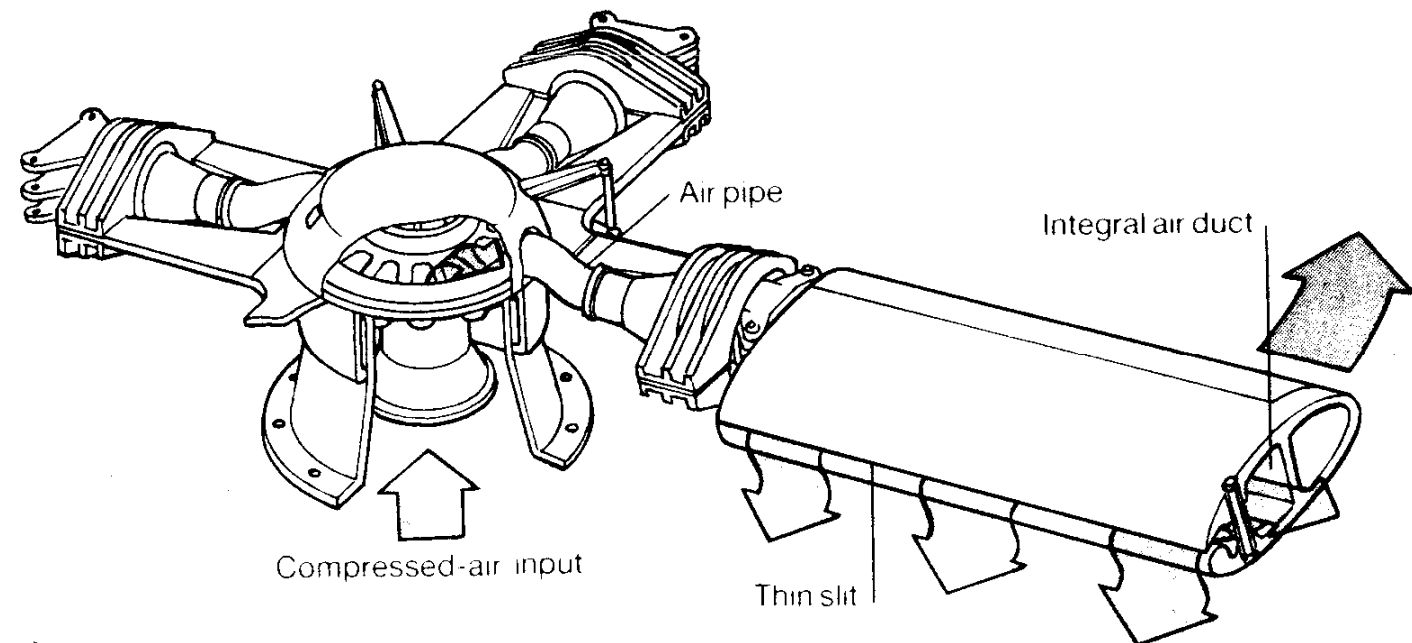
- Mostramos un rotor CCR (*circulation control rotor*) en el que una fina capa de aire se expulsa tangencialmente sobre el borde de salida de un perfil cuasi-elíptico.
- Eliminamos el desprendimiento de la capa límite y movemos el punto de remanso posterior hacia el intradós.





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

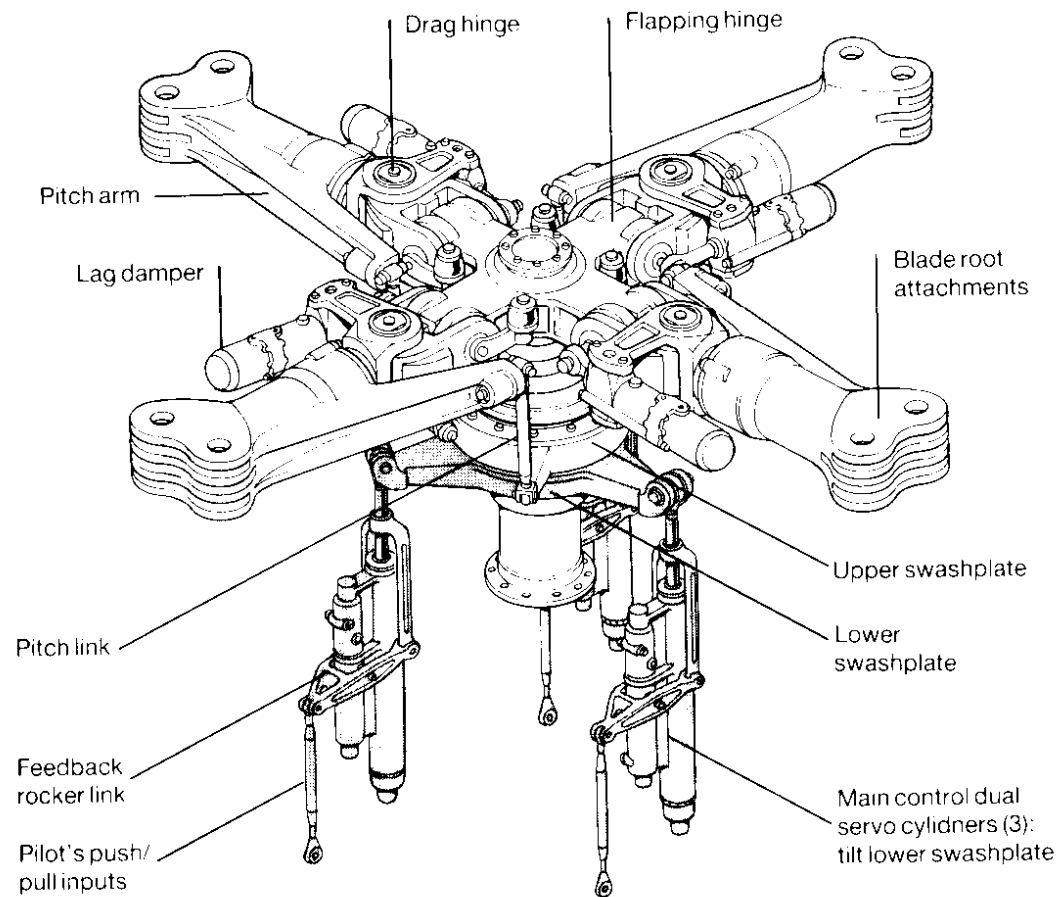
- A velocidades mayores se utiliza un segundo chorro por una ranura del borde de ataque de forma que se genera una sustentación apreciable en la zona de flujo inverso.





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

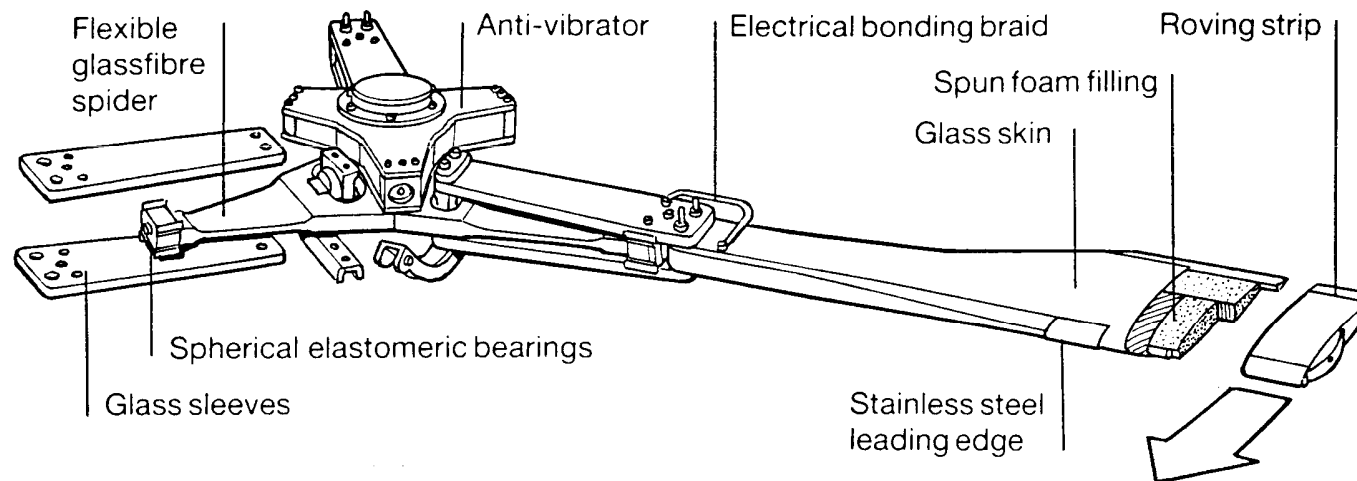
- Rotor articulado (Chinook).





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- *Starflex* (Aérospatiale).





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

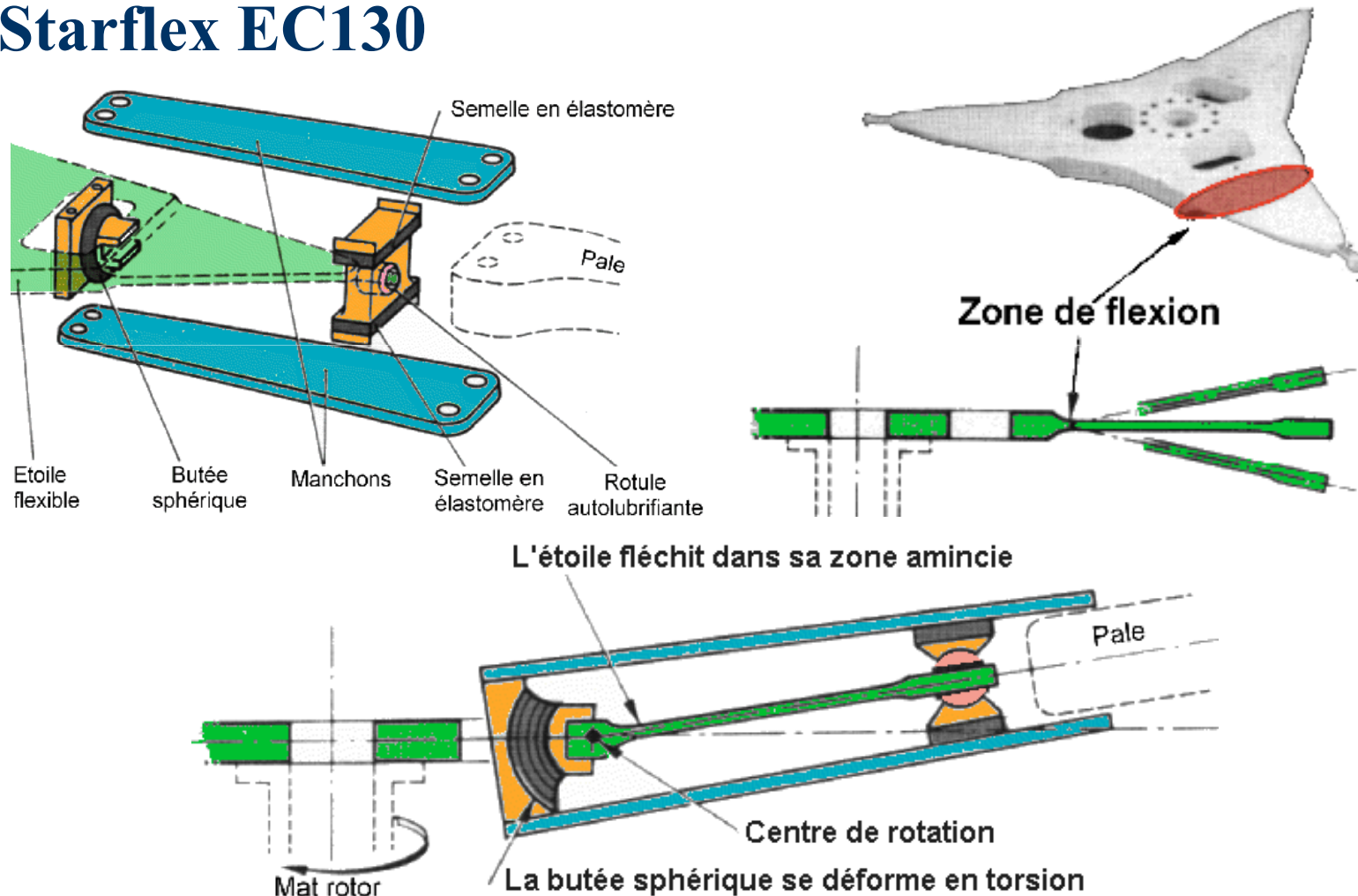
- **Starflex EC130**





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

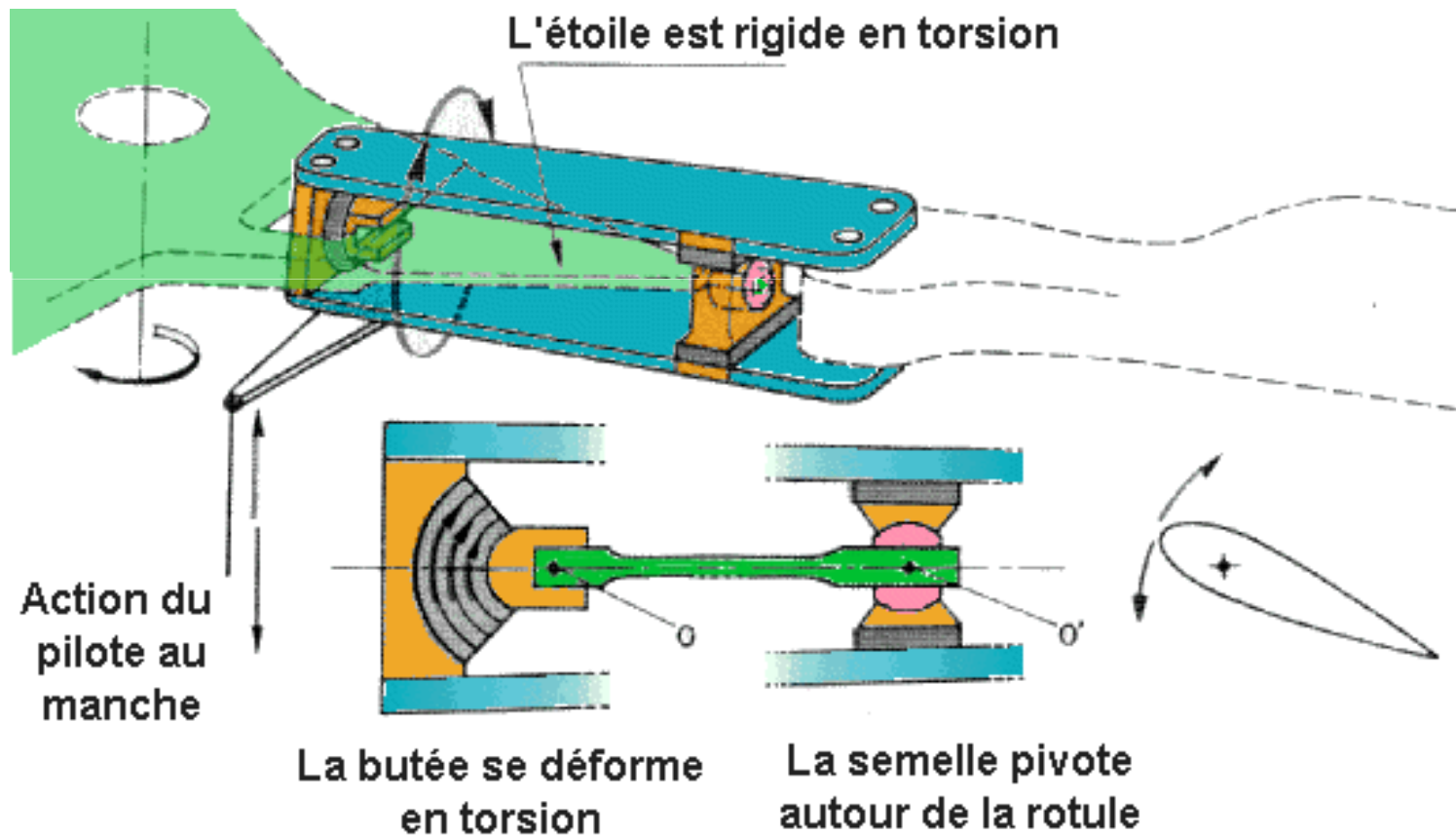
### ● Starflex EC130





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- **Starflex EC130**

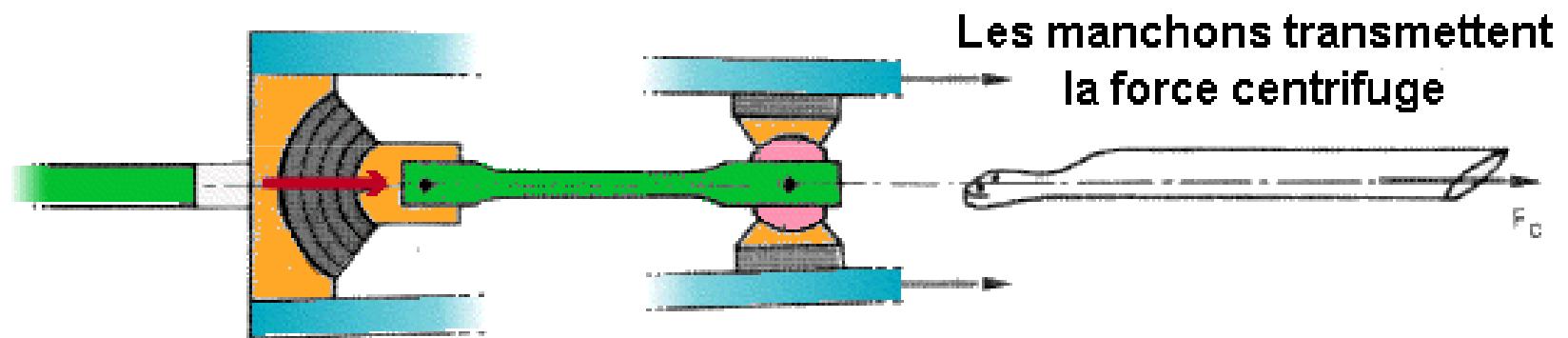






## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- **Starflex EC130**

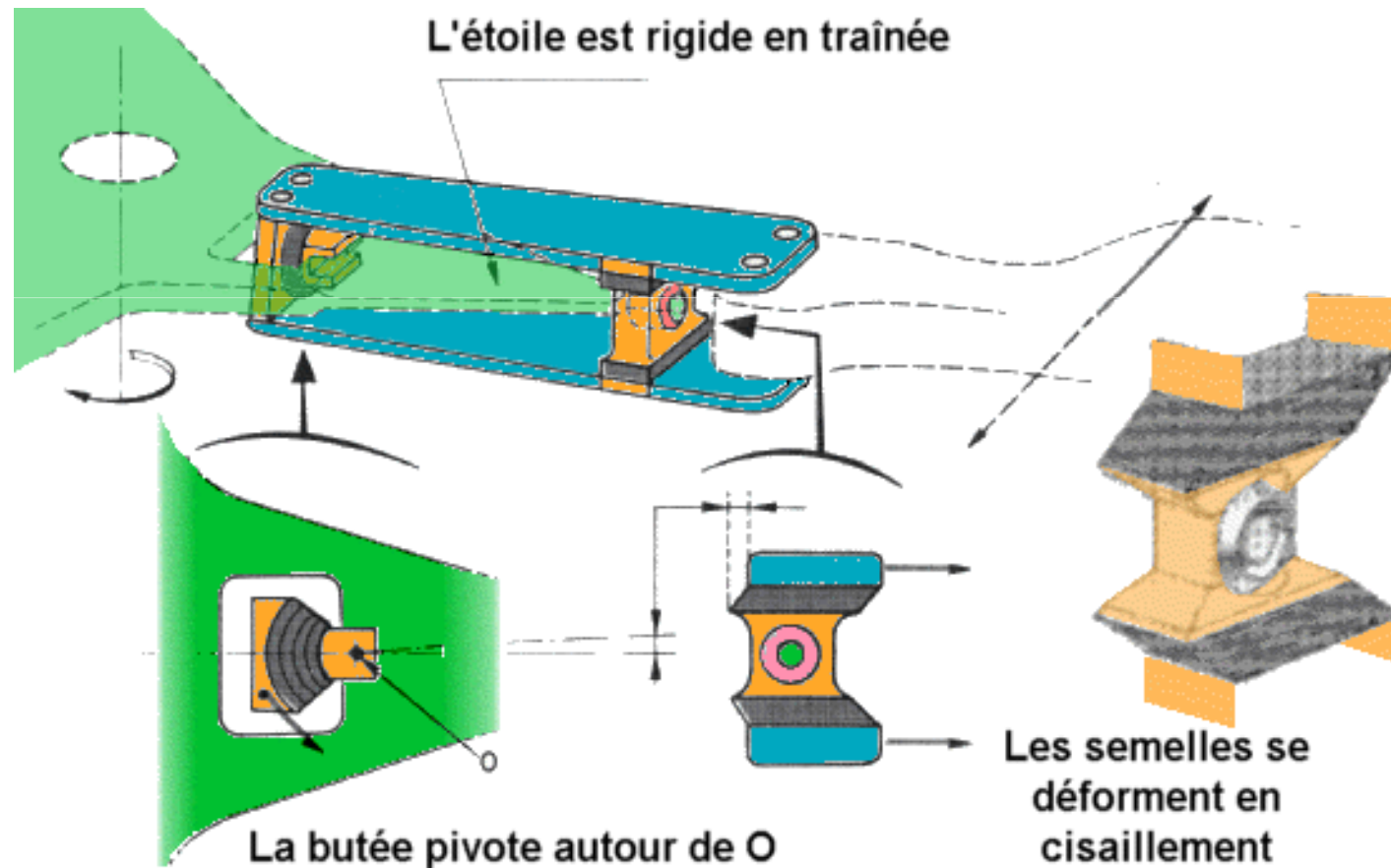


La butée, rigide en compression, transmet la force à l'étoile



## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- **Starflex EC130**





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- ***Spheriflex (EC 120B, Colibri)***

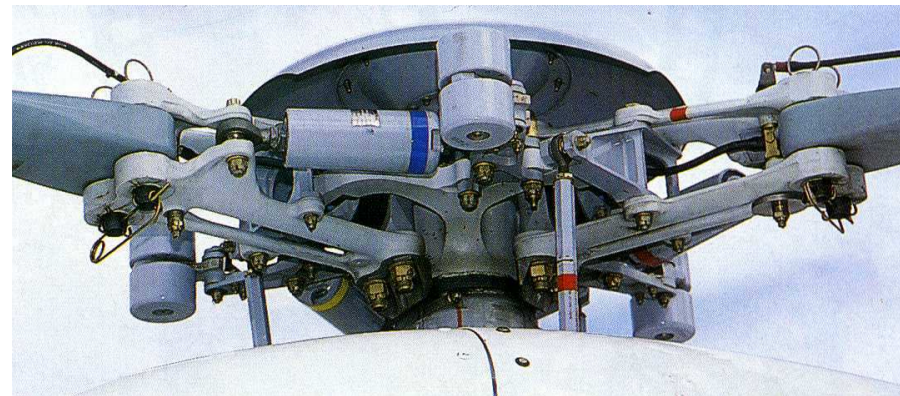
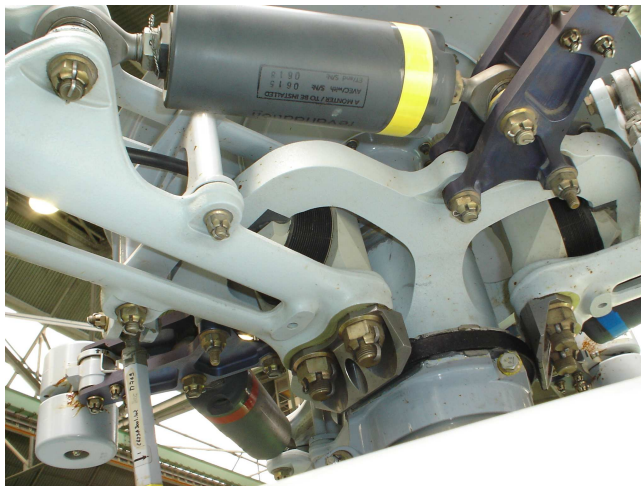
- Las 3 funciones de cambio de paso, batimiento y arrastre están articuladas a través de un cojinete esférico laminado.
- El cuerpo del rotor es un plato de acero inoxidable que incorpora 5 suspensiones en las cuales acomoda un cojinete esférico;
  - esos cojinetes proporcionan todas las funciones de cambio de paso, y
  - transmiten las cargas centrífugas de la pala al cuerpo del buje.
- El buje constituye un componente integrado en el mástil.



## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- *Spheriflex (EC 120B, Colibri)*

- Un adaptador de frecuencia localizado entre cada manguito permitirá la amortiguación en arrastre.
- La pala estará unida a los manguitos mediante 2 pernos de desconexión rápida.
- Un casquete esférico encima del buje del rotor reducirá los efectos de la resistencia aerodinámica.



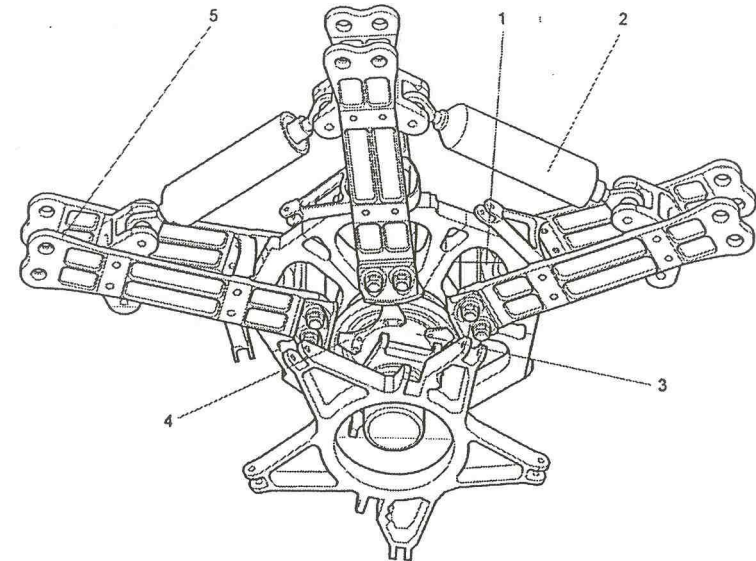
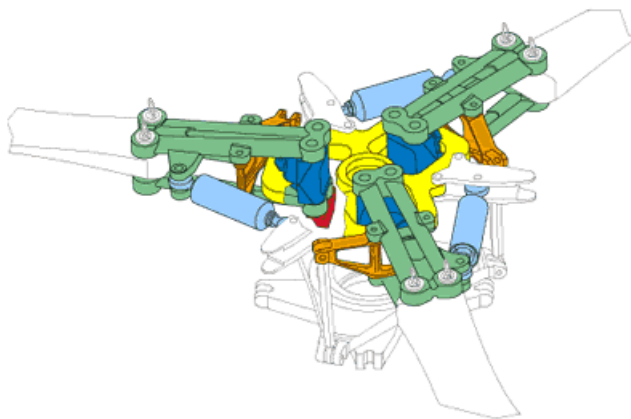


## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- *Spheriflex (EC 120B, Colibri)*

- Elementos:

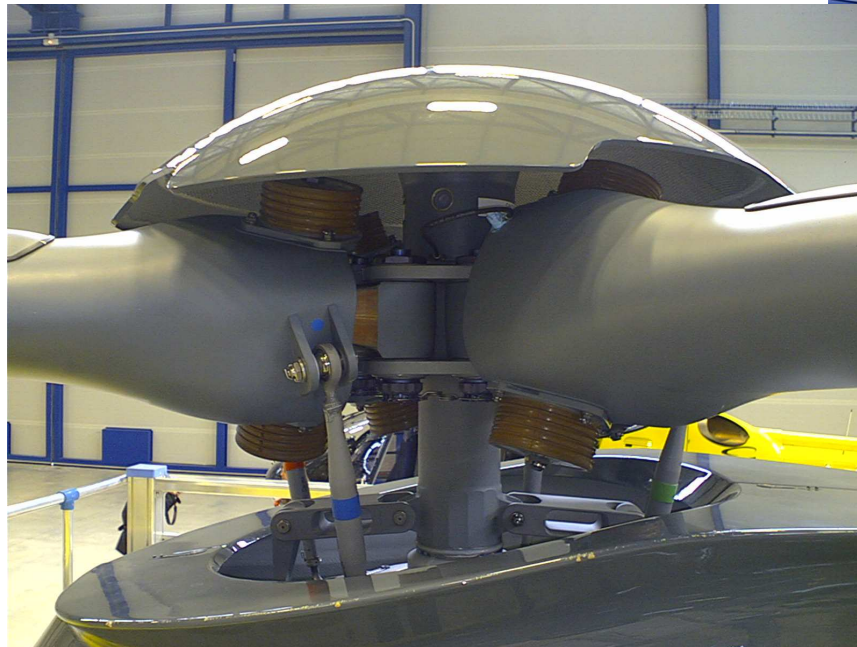
- Cojinetes esféricos (1).
- Amortiguador visco-elástico (2).
- Cuerpo de cabeza rotor (3).
- Limitadores de ráfaga (4).
- Manguitos (5).





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

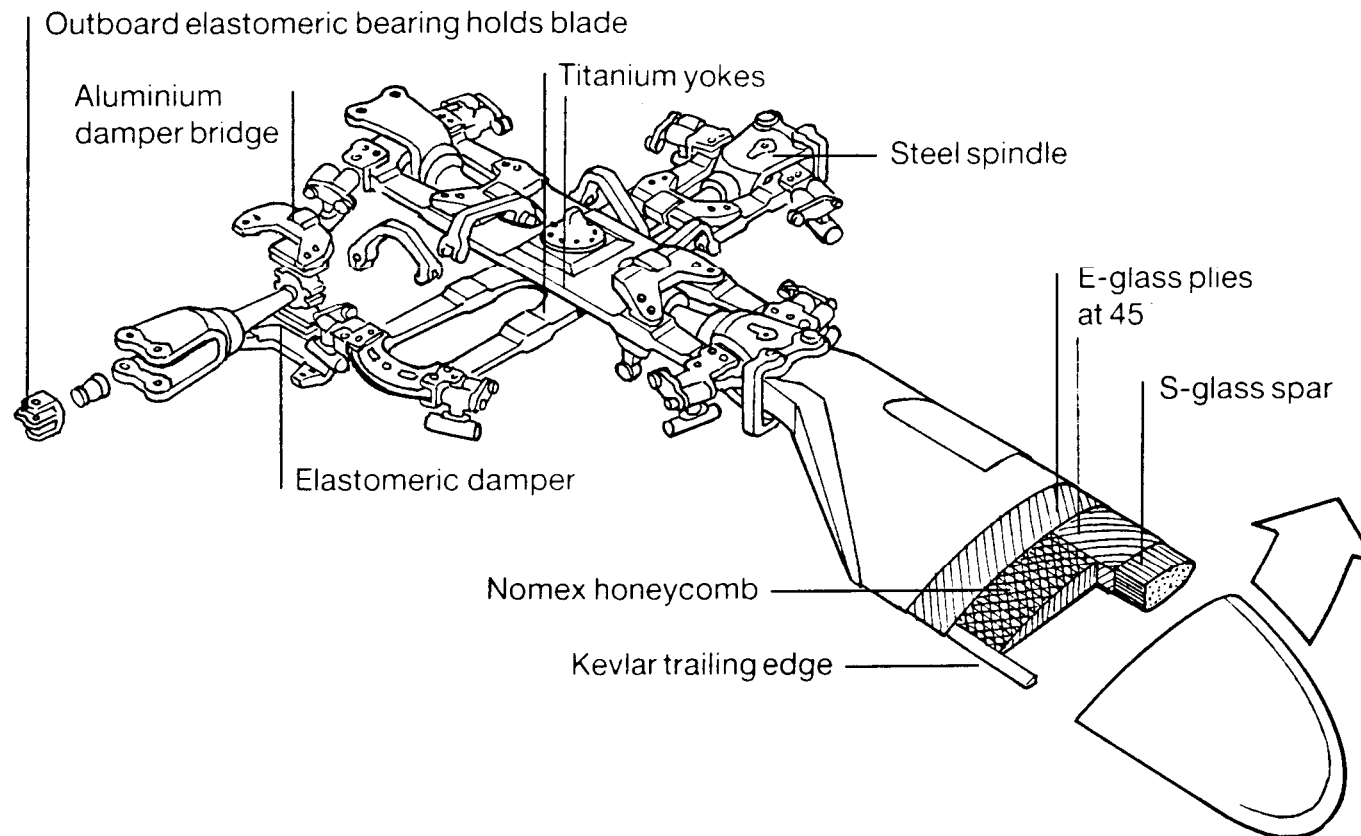
- *EC 135*





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

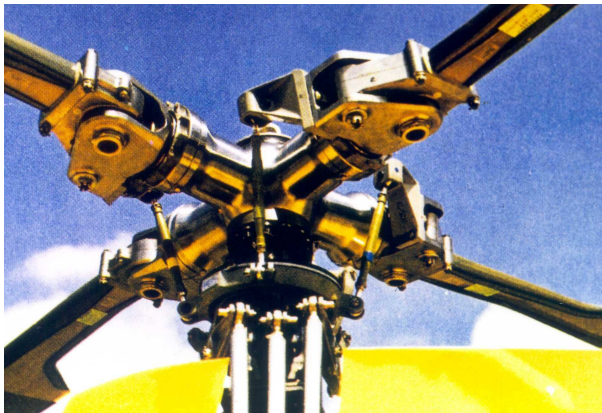
- Rotor del EH 101





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- MBB-BO 105

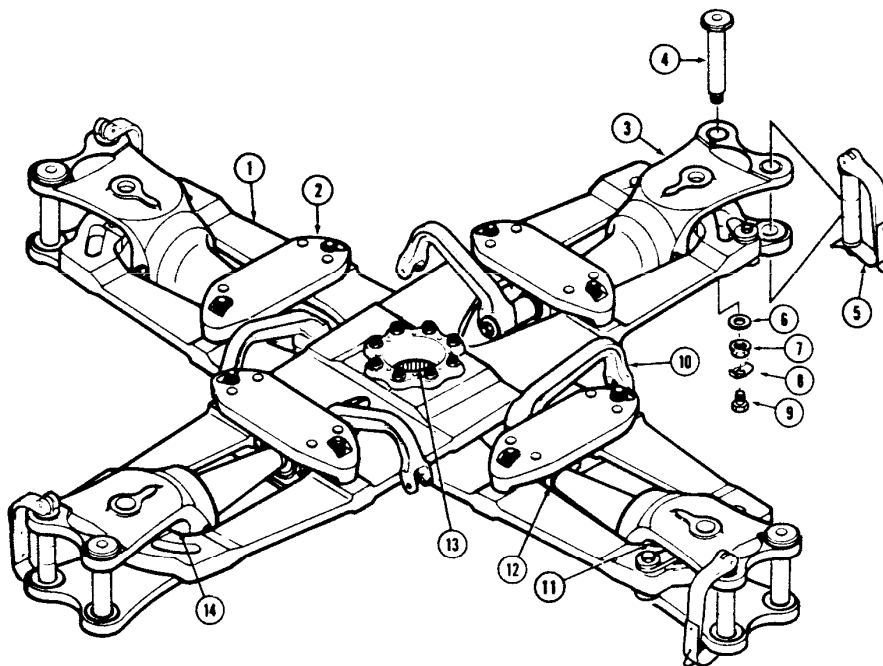




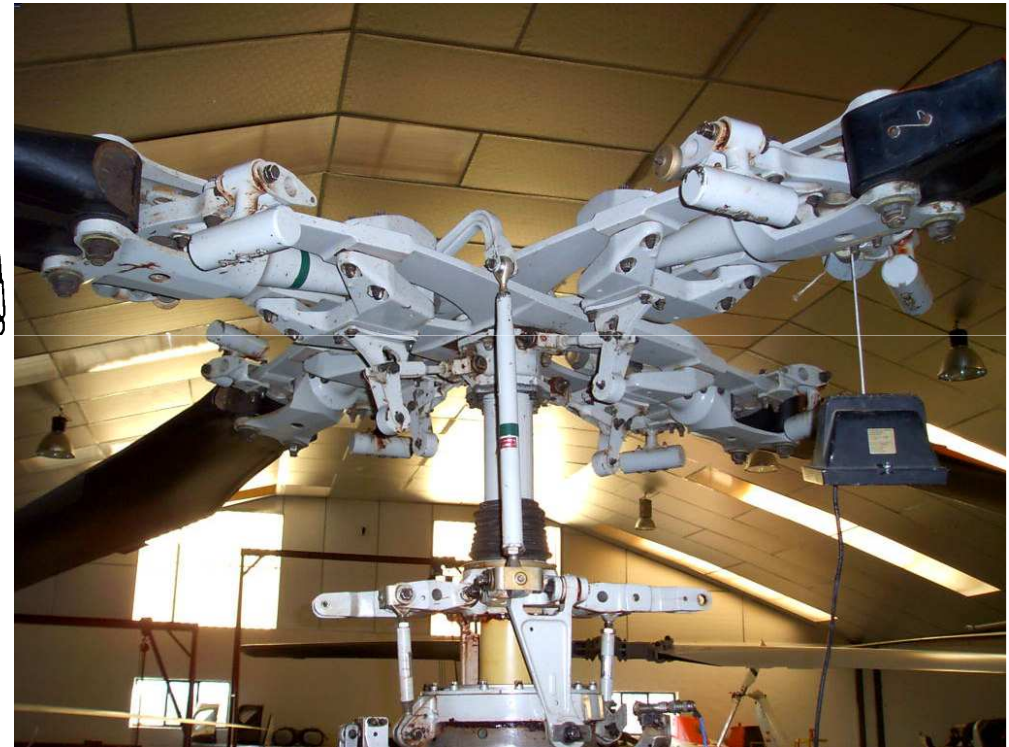


## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

### ● AB 412



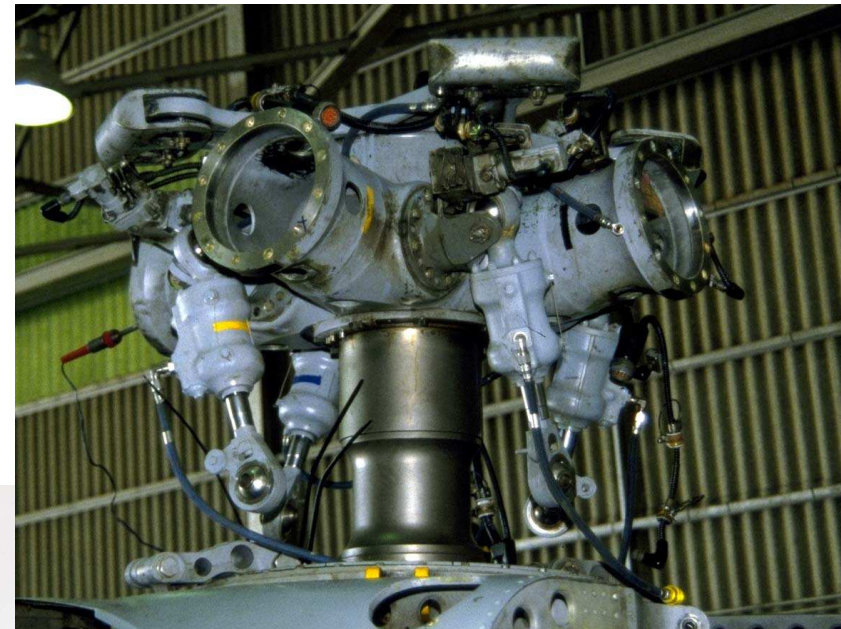
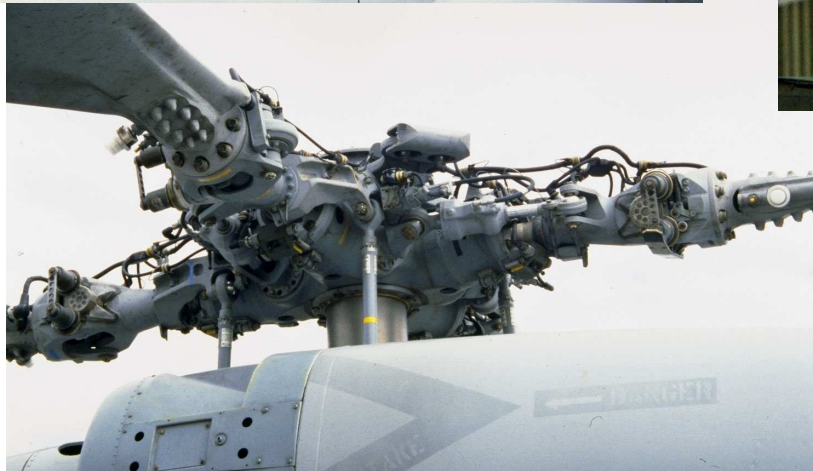
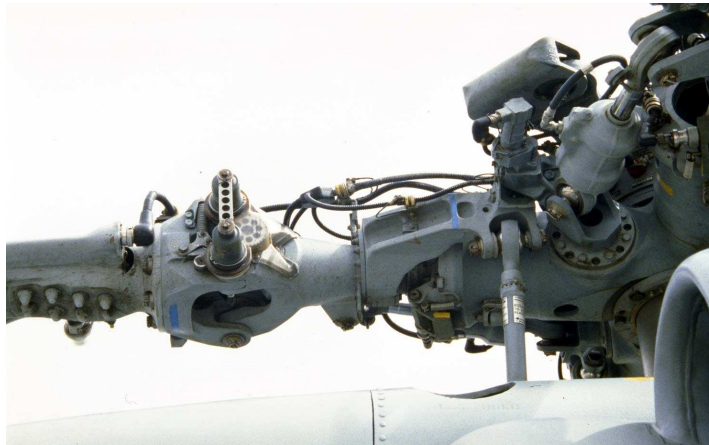
- |                    |                           |
|--------------------|---------------------------|
| 1. Yoke            | 8. Lock                   |
| 2. Damper bridge   | 9. Plug                   |
| 3. Spindle         | 10. Pitch horn            |
| 4. Blade bolt      | 11. Pivot bearing         |
| 5. Expandable bolt | 12. Damper bearing        |
| 6. Washer          | 13. Upper cone seat       |
| 7. Nut             | 14. Pivot bearing fitting |





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- SH 60B





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- MD 900

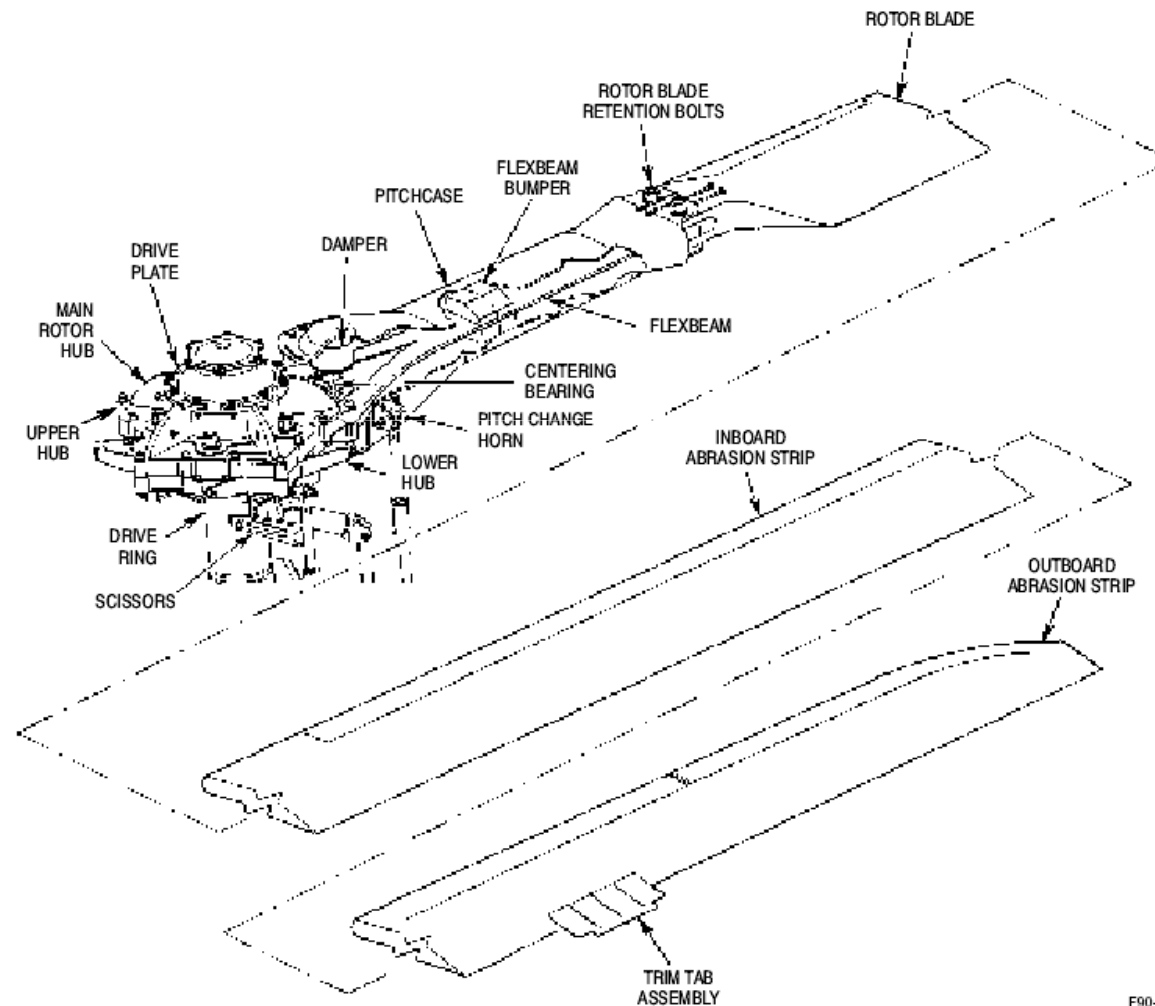


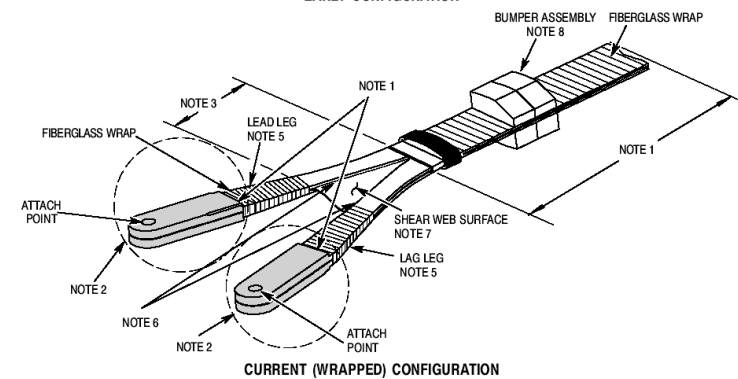
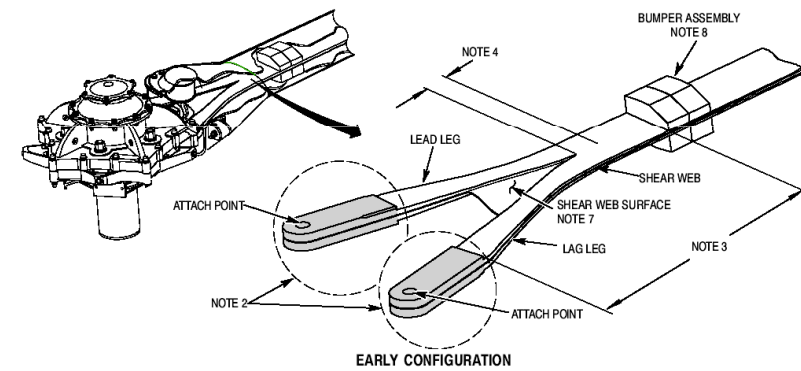
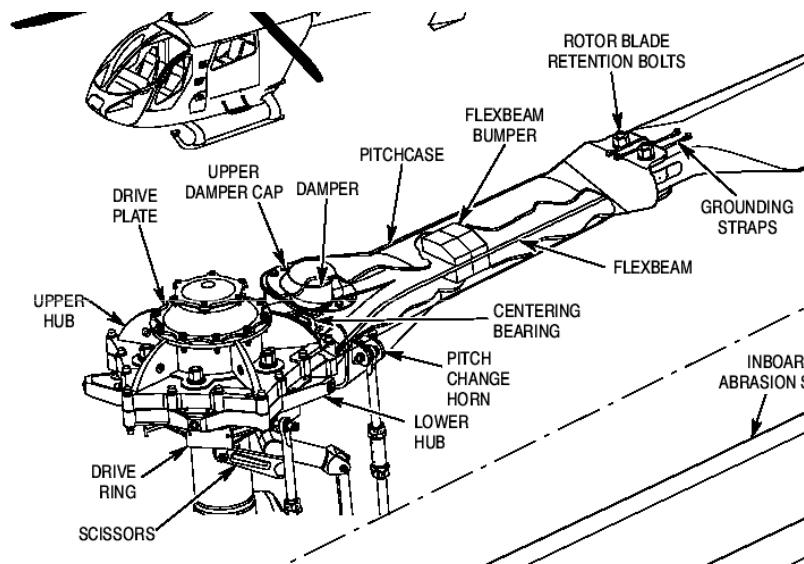
Figure 7-4. Main Rotor System

F90-046



# COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

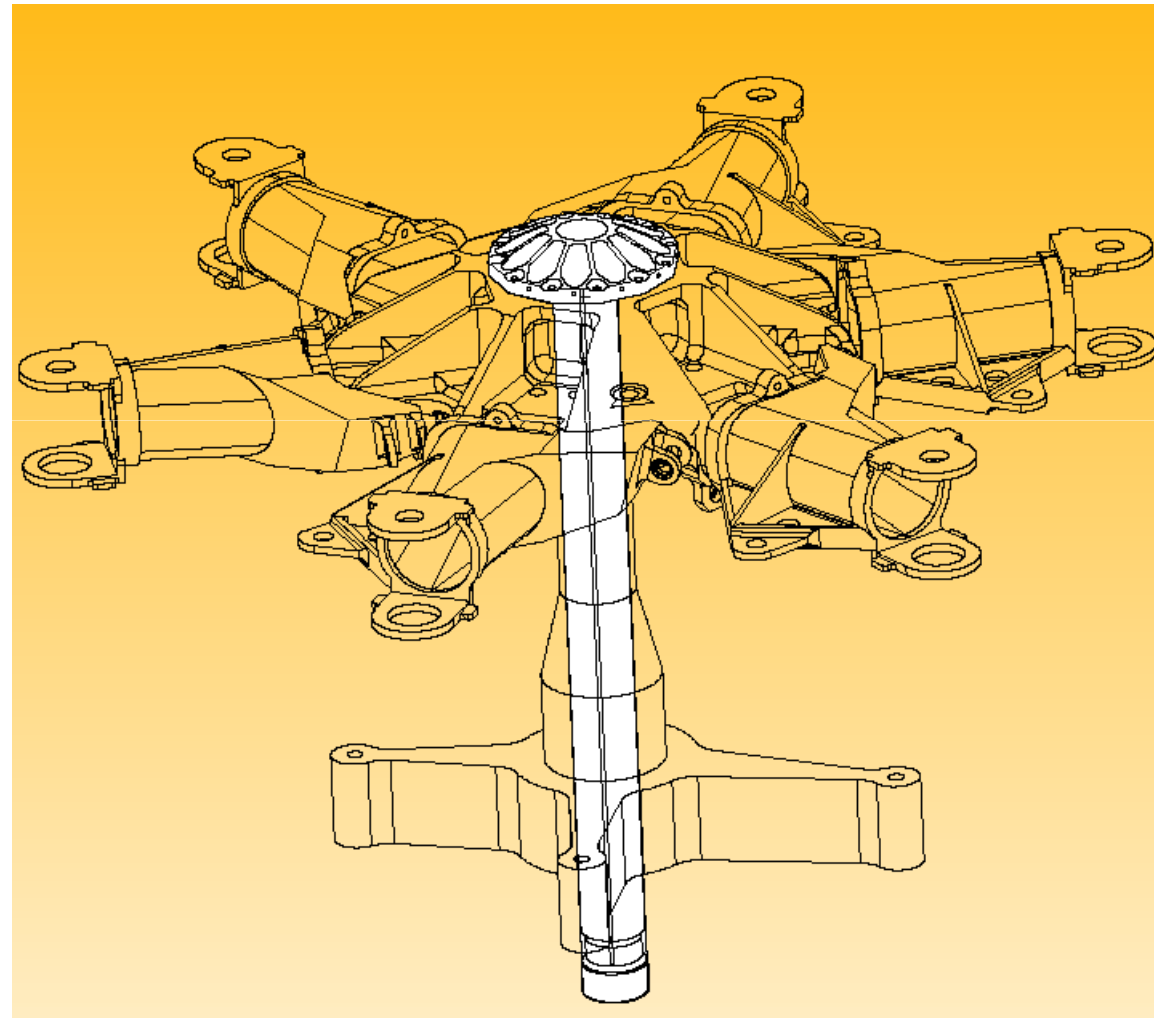
## ● MD 900





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- MD 600N





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- Super Puma. Cougar.





## COMPARACIÓN ENTRE ROTORES

- HUGHES 500





## Bibliografía

- M.A. Barcala Montejano y Ángel A. Rodríguez Sevillano. *Helicópteros. Teoría y Descriptiva*. Sección de Publicaciones E.U.I.T. Aeronáutica. Fundación General U.P.M.
- Alastair K. Cooke, Eric W.H. Fitzpatrick. *Helicopter Test and Evaluation*. Blackwell Science.
- A.R.S. Bramwell, George Done, David Balmford. *Bramwell's Helicopter Dynamics*. Butterwoth Heinemann, 2 edition 2001.
- J. Gordon Leishman. *Principles of Helicopter Aerodynamics*. Cambridge University Press, 2000.
- J. Seddon, Simon Newman. *Basic Helicopter Aerodynamics*. Blackwell Science, second edition 2002.
- John Watkinson. *The Art of the Helicopter*. Elsevier Butterwoth Heinemann, 2004.